



Rui Miguel Marques Mestre

Licenciado em Engenharia Civil

Modelação numérica da reflexão e do espraçamento em praias e em estruturas marítimas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira
Neves, Doutora, FCT-UNL/LNEC

Coorientador: Maria Teresa Leal Gonsalves Veloso dos
Reis, Doutora, LNEC

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário Jorge Vicente da Silva

Arguente: Doutor Rui Jorge Pereira Capitão

Vogal: Prof. Doutora Maria da Graça Reis Silva Oliveira Neves



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro 2015

“Copyright” Rui Miguel Marques Mestre, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Professora Maria da Graça Neves pela sua dedicação, total disponibilidade e simpatia com que sempre me recebeu, pelos seus ensinamentos, pelas suas sugestões sempre pertinentes e pelo seu incondicional apoio e paciência durante este último ano, sem o qual não teria sido possível realizar esta dissertação.

Agradeço à Dr.^a Teresa Reis pelo tempo que generosamente me dedicou, pela sua crítica construtiva, pelo seu apoio incondicional permanente e pelo empenho que desde sempre colocou na minha orientação.

Agradeço ao Dr. Keming Hu por toda a cooperação e prontidão na resolução das dificuldades que surgiram aquando da utilização do modelo numérico AMAZON.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), por todo o apoio e material fornecido.

Aos meus amigos e colegas que sempre me apoiaram.

Por fim, agradeço à minha família todo o suporte e paciência, em especial à minha mãe e ao meu irmão, por todos os esforços que fizeram para eu realizar o meu Mestrado Integrado em Engenharia Civil.

Resumo

As preocupações de projetistas na concepção de estruturas marítimas utilizando modelos numéricos como ferramentas de dimensionamento, prendem-se com a sua fiabilidade, tempo de processamento e precisão. Assim, a calibração e validação de modelos numéricos é essencial para os tornar ferramentas úteis para o projeto de obras marítimas.

A presente dissertação tem como objetivo a calibração e validação do modelo numérico AMAZON, baseado na teoria da onda em condições de águas pouco profundas, para dois casos de estudo distintos com base em dados de ensaios realizados anteriormente.

O primeiro caso consiste no estudo do espraçamento numa praia barra-fossa cujas condições de batimetria, nível da água e condições de agitação marítima inseridas no AMAZON correspondem às de ensaios em modelo físico realizados à escala 1:5 na Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona. Como o modelo utiliza parâmetros que devem ser calibrados, na sua aplicação e exploração realizou-se um estudo de sensibilidade a esses parâmetros. Com base nos resultados do AMAZON, utilizaram-se programas desenvolvidos em MatLab para o cálculo do espraçamento e do coeficiente de reflexão e compararam-se os resultados com os obtidos nos ensaios em modelo físico. Verificou-se que os resultados do AMAZON são bastante próximos dos valores obtidos pelos ensaios.

O segundo caso consiste no estudo de uma estrutura conversora de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante - OWC-WEC (*Oscillating Water Column - Wave Energy Converter*), para a qual o modelo AMAZON nunca tinha sido utilizado. Os dados introduzidos no modelo relativos ao perfil da estrutura, nível da água e condições de agitação correspondem aos dos ensaios realizados à escala 1:35 no LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil). Realizou-se um estudo de sensibilidade dos parâmetros do modelo no que respeita à elevação da superfície livre junto e no interior da câmara de água, ao fator de amplificação e ao desfasamento, e compararam-se os resultados com os obtidos nos ensaios em modelo físico. Os resultados do AMAZON constituem um incentivo para a realização e/ou análise de ensaios para diferentes profundidades, aberturas da parede vertical da câmara de água e períodos de onda incidente, que permitam calibração e validação adicionais dos parâmetros do modelo.

Termos chave: Espraçamento; Coeficiente de reflexão; Modelo AMAZON; Praia barra-fossa; Estrutura conversora de energia das ondas; Coluna de água oscilante.

Abstract

The concerns of designers of maritime structures who apply numerical models as design tools relate to their reliability, computational time and accuracy. Consequently, the validation and calibration of numerical models is essential to make them useful tools for the design of these structures.

The main goal of this dissertation is to calibrate and validate the nonlinear shallow water numerical model, AMAZON, for two different case studies based on data from physical model tests performed previously.

The first case study relates to the analysis of run-up on a barred beach. Bathymetry, water level and wave conditions inserted into the AMAZON model correspond to those of physical model tests carried out at a 1:5 scale at the Polytechnic University of Catalonia, Barcelona. As the model uses parameters that must be calibrated, a sensitivity analysis on those parameters was carried out in its application and exploitation. Then, MatLab programs were developed to calculate from the AMAZON results the beach run-up and reflection coefficient of waves, which were then compared to the physical model data. It was found that the AMAZON results are quite close to the values from the physical model.

The second case study concerns the analysis of an Oscillating Water Column - Wave Energy Converter (OWC-WEC), for which the AMAZON model had never been used. The AMAZON input data for the structure profile, water level and wave conditions correspond to those of physical model tests performed at a 1:35 scale at LNEC (National Laboratory for Civil Engineering). A sensitivity analysis on the model parameters was conducted regarding the free surface elevation near and inside the water chamber, the amplification factor and the phase lag. The comparison of the AMAZON results with the physical model data showed that AMAZON results are encouraging though more tests are required for different water depths, vertical openings and incoming wave periods, allowing further calibration and validation of the model.

Keywords: Run-up; Reflection coefficient; AMAZON model; Barred beach; Wave energy converter; Oscillating water column.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Estrutura da dissertação	2
2. Modelação numérica	3
2.1 Generalidades	3
2.2 Modelo numérico AMAZON	4
3. Fenómenos físicos das ondas	7
3.1 Características das ondas	7
3.2 Rebentação	9
3.3 Espraçamento	10
3.4 Reflexão	12
4. Caso de estudo 1 – Espraçamento e reflexão numa praia com perfil barra-fossa	15
4.1 Descrição do caso de estudo	15
4.2 Aplicação de fórmulas empíricas de espraçamento	21
4.3 Aplicação do modelo AMAZON	21
4.3.1 Análise de sensibilidade aos parâmetros do modelo	21
4.3.2 Comparação de resultados de diferentes malhas computacionais	29
5. Caso de estudo 2 – Estrutura conversora de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante	33
5.1 Enquadramento	33
5.2 Descrição do caso de estudo	33
5.3 Aplicação do modelo AMAZON	35
5.3.1 Análise de sensibilidade à dimensão das malhas e ao parâmetro n	35
5.3.2 Calibração do modelo AMAZON e comparação com o modelo físico	37
6. Considerações finais e desenvolvimentos futuros	43
Referências bibliográficas	47
Anexo A – Exemplo de introdução de dados no modelo AMAZON	51
Anexo B – Ficheiros MatLab® utilizados	53
Anexo C – Publicação em Congresso Internacional	57

Índice de Figuras

Figura 3.1 – Algumas características das ondas.	8
Figura 3.2 – Equações da celeridade para diferentes profundidades da zona de propagação (USACE, 2006).	8
Figura 3.3 – Rebentação progressiva (<i>spilling</i>) (USACE, 2006).	9
Figura 3.4 – Rebentação mergulhante (<i>plunging</i>) (USACE, 2006).	9
Figura 3.5 – Rebentação colapsante (<i>collapsing</i>) (USACE, 2006).	10
Figura 3.6 – Rebentação de fundo (<i>surging</i>) (USACE, 2006).	10
Figura 3.7 – Espraiamento e refluxo (adaptado de USACE, 2006).	10
Figura 3.8 – Esquema para utilização do método de separação das ondas incidente e refletida.	13
Figura 4.1 – Vista em perspectiva do canal de ondas e perfil da praia em construção (Sancho, SPANWAVE II).	15
Figura 4.2 – Vista da superfície final do fundo e sua rugosidade (Sancho, SPANWAVE II).	16
Figura 4.3 – Vista longitudinal do fundo do canal de ondas.	16
Figura 4.4 – Vista transversal do canal de ondas (Sancho, SPANWAVE II).	17
Figura 4.5 – Vistas do gerador de ondas (Sancho, SPANWAVE II).	17
Figura 4.6 – Imagens do local de rebentação para as ondas tipo A, B e C (de cima para baixo, respetivamente) (Sancho, SPANWAVE II).	18
Figura 4.7 – Localização das sondas ao longo do canal.	19
Figura 4.8 – Sondas com 1m de comprimento, durante a calibração e durante os ensaios (Sancho, SPANWAVE II).	20
Figura 4.9 – Sonda de medição do espraiamento, com 2.5m de comprimento (Sancho, SPANWAVE II).	20
Figura 4.10 - Representação esquemática da discretização da malha computacional utilizada (a cinzento), da praia (a vermelho), do nível de água em repouso (a azul) e da localização das secções de medição (a verde), em protótipo.	22
Figura 4.11 – Comparação do espraiamento médio de ensaios físicos com os resultados de espraiamento para as ondas tipo A, B e C.	27
Figura 4.12 – Comparação de rmse (H _{méd}) para as diferentes malhas computacionais.	30
Figura 4.13 – Comparação de rmse (T _{méd}) para as diferentes malhas computacionais.	30
Figura 5.1 – Modelo físico na zona da câmara para quatro instantes durante um ensaio para T=1.0s e H=0.038m.	34
Figura 5.2 – Esquema do canal, da câmara e posições das sondas (dimensões em metros). .	34
Figura 5.3 – Representação esquemática da discretização da malha computacional (a cinzento), da rampa (a vermelho), da câmara e barreira vertical (a roxo), do nível de água em repouso (a azul) e da localização das secções de medição (a verde), em protótipo.	35
Figura 5.4 – Séries temporais da elevação da superfície livre obtidas com o modelo AMAZON para as sondas G5 e G7, com as malhas 0.02m, 0.004m e 0.001m (n=1, T=1.15s e H=0.038m).	36
Figura 5.5 – Séries temporais da elevação da superfície livre do modelo AMAZON para as sondas G5 e G7 com a malha 0.004m, para diferentes valores de n (T=1.15s e H=0.038m). ..	38
Figura 5.6 – Séries temporais da elevação da superfície livre fora da câmara (sonda G5), obtidas com o modelo físico e com o modelo AMAZON para a malha 0.004m, para diferentes valores de n (T=1.15s e H=0.038m).	38

Figura 5.7 – Médias da elevação da superfície livre dentro da câmara, obtidas com o modelo físico e com o modelo AMAZON para a malha 0.004m, para diferentes valores de n ($T=1.15s$ e $H=0.038m$)).	39
Figura 5.8 – Séries temporais da elevação da superfície livre fora da câmara (sonda G5), obtidas com o modelo físico e com o modelo AMAZON para a malha 0.004m, para $n=1$ ($T=0.89s$ e $H=0.038m$).	40
Figura 5.9 – Séries temporais da elevação da superfície livre fora da câmara (sonda G5), obtidas com o modelo físico e com o modelo AMAZON para a malha 0.004m, para $n=1$ ($T=1.60s$ e $H=0.038m$).	40
Figura 5.10 – Médias da elevação da superfície livre dentro da câmara, obtidas com o modelo físico e com o modelo AMAZON para a malha 0.004m, para $n=1$ ($T=0.89s$ e $H=0.038m$).	40
Figura 5.11 – Médias da elevação da superfície livre dentro da câmara, obtidas com o modelo físico e com o modelo AMAZON para a malha 0.004m, para $n=1$ ($T=1.60s$ e $H=0.038m$).	41

Índice de Quadros

Quadro 4.1 – Resumo dos parâmetros dos ensaios (Sancho, SPANWAVE II).	18
Quadro 4.2 – Comparação de valores de espreamento médio, R_{med} , obtidos pelas fórmulas empíricas e nos ensaios em modelo físico.	21
Quadro 4.3 – Erros obtidos pelas fórmulas empíricas em relação aos ensaios em modelo físico.	21
Quadro 4.4 – Coordenadas das sondas iniciais inseridas no modelo AMAZON.	23
Quadro 4.5 – Onda tipo A - Análise de sensibilidade à Profundidade Mínima Molhada (Profundidade Mínima de Atrito=0.1m, Atrito de Fundo= 10^{-6}).	23
Quadro 4.6 – Onda tipo A - Análise de sensibilidade à Profundidade Mínima de Atrito (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Atrito de Fundo= 10^{-6}).	24
Quadro 4.7 – Onda tipo A - Análise de sensibilidade ao Atrito de Fundo (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Profundidade Mínima de Atrito=0.5m).	24
Quadro 4.8 – Onda tipo A - Análise de sensibilidade ao Atrito de Fundo (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Profundidade Mínima de Atrito=0.015m).	25
Quadro 4.9 – Onda tipo A - Análise de sensibilidade à Profundidade Mínima de Atrito (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Atrito de Fundo=0.03).	25
Quadro 4.10 – Onda tipo A - Análise de sensibilidade da Profundidade Mínima de Atrito (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Atrito de Fundo=0.01).	26
Quadro 4.11 – Onda tipo B - Análise de sensibilidade à Profundidade Mínima de Atrito (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Atrito de Fundo=0.01).	26
Quadro 4.12 – Onda tipo B - Análise de sensibilidade à Profundidade Mínima de Atrito (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Atrito de Fundo=0.03).	26
Quadro 4.13 – Onda tipo C - Análise de sensibilidade à Profundidade Mínima de Atrito (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Atrito de Fundo=0.01).	26
Quadro 4.14 – Onda tipo C - Análise de sensibilidade à Profundidade Mínima de Atrito (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Atrito de Fundo=0.03).	26
Quadro 4.15 – Parâmetros ótimos de calibração para o caso de estudo (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Profundidade Mínima de Atrito=0.003m, Atrito de Fundo =0.02).	28
Quadro 4.16 – Coeficientes de reflexão dos modelos físico e numérico.	28
Quadro 4.17 – rmse para H_{med} e T_{med}	29
Quadro 4.18 – Tempo computacional das malhas para os tipos de onda A, B e C.	31
Quadro 5.1 – Coordenadas das sondas inseridas no modelo AMAZON.	36
Quadro 5.2 – Tamanho da malha e tempo computacional das diversas malhas consideradas (T=1.15s).	37
Quadro 5.3 – Fator de amplificação e desfasamento para os resultados experimentais e numéricos (n=1, T=1.15s).	39
Quadro 5.4 – Fator de amplificação e desfasamento para os resultados experimentais e numéricos (n=1, T=0.89s e T=1.60s).	41

Lista de Símbolos

A_c [m]	Amplitude da crista da onda
A_s [m]	Amplitude da cava da onda
c [m.s ⁻¹]	Celeridade da onda
d [m]	Profundidade no domínio de cálculo do modelo AMAZON
g [m.s ⁻²]	Aceleração da gravidade
h [m]	Profundidade
h_b [m]	Profundidade na rebentação
H [m]	Altura da onda
H_0 [m]	Altura de onda ao largo; para ondas irregulares, corresponde à altura significativa de onda ao largo
H_{orms} [m]	Altura média quadrática de onda em águas profundas (ao largo)
H_b [m]	Altura de onda na rebentação
H_i [m]	Altura de onda incidente
$H_{méd}$ [m]	Altura média de onda
H_r [m]	Altura de onda refletida
H_{rms} [m]	Altura média quadrática de onda
H_s [m]	Altura significativa de onda
K_r [-]	Coeficiente de reflexão
L [m]	Comprimento de onda
L_0 [m]	Comprimento de onda ao largo
n [-]	Fator de calibração do modelo AMAZON existente para o caso de estruturas OWC-WEC
NR [m]	Nível de água em repouso
$rmse$ [-]	Raiz do erro quadrático médio
R [m]	Espraiamento (<i>Run-up</i>)
$R_{2\%}$ [m]	Espraiamento excedido apenas por 2% de todos os espraiamentos
$R_{máx}$ [m]	Espraiamento máximo
$R_{méd}$ [m]	Espraiamento médio
T [s]	Período de onda
$T_{máx}$ [s]	Período máximo de onda

$T_{\text{méd}}$ [s]	Período médio de onda
T_p [s]	Período de pico do espectro das ondas
T_s [s]	Período significativo de onda
x_b [m]	Local aproximado de rebentação
α [°]	Ângulo do talude com a horizontal
η [m]	Elevação da superfície livre da água em relação ao nível de repouso
ξ [-]	Número de Iribarren ou parâmetro de rebentação
ξ_0 [-]	Número de Iribarren ao largo
ξ_s [-]	Número de Iribarren determinado usando o comprimento de onda calculado com T_s

1. Introdução

1.1 Considerações gerais

Dado que Portugal continental tem uma extensa zona costeira que está geralmente associada a atividades económicas, é importante desenvolver métodos e modelos de cálculo que permitam apoiar o dimensionamento de estruturas marítimas, costeiras e portuárias, que salvaguardem a segurança de pessoas e de bens materiais.

Para isso, é necessário estudar a interação da agitação marítima com as estruturas e dispor de ferramentas de cálculo fiáveis e eficientes para apoio aos projetos destas obras. Algumas das ferramentas mais utilizadas são baseadas em formulações empíricas, geralmente desenvolvidas a partir de resultados de modelos físicos, embora a aplicação destas formulações esteja limitada a condições específicas de agitação marítima e de configurações simples. A modelação física é um método fiável para obtenção de resultados, mas tem o inconveniente de ser dispendiosa, morosa e necessitar de infraestruturas e equipamento muito específico e requerer uma elevada experiência de quem realiza os ensaios. Atualmente é também possível utilizarem-se modelos numéricos, mas a sua fiabilidade é, em alguns casos, menor em comparação com os modelos físicos, embora tenham um custo associado muito inferior (Reis & Neves, 2010).

Com a finalidade de se obterem modelos numéricos rápidos e fiáveis para apoio a projetos de obras marítimas em Engenharia Civil, os modelos numéricos, como é o caso do modelo numérico AMAZON, sobre o qual se desenvolve a presente dissertação, têm sido alvo de constante desenvolvimento nos últimos anos, devido às suas grandes potencialidades.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é a validação do modelo numérico AMAZON para o estudo dos fenómenos da reflexão e do espraiamento numa praia barra-fossa e de amplificação da agitação numa estrutura conversora de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante - OWC-WEC (*Oscillating Water Column - Wave Energy Converter*).

O modelo AMAZON é um modelo numérico bidimensional baseado na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas. Originalmente o modelo foi concebido essencialmente para estruturas impermeáveis e desde então tem estado em constante desenvolvimento.

Os resultados do modelo numérico AMAZON, obtidos no âmbito da presente dissertação, são influenciados pela batimetria, características da estrutura, condições da

agitação marítima, nível da água e parâmetros do modelo, os quais foram alvo de calibração, sendo, para tal, os resultados do modelo comparados com dados experimentais.

Para validar a sua aplicação a praias, utilizaram-se dados de ensaios em modelo físico bidimensional (Sancho, SPANWAVE II) obtidos anteriormente na Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona. Para validar a aplicação do modelo a estruturas verticais como é o caso do OWC-WEC, utilizaram-se também dados de ensaios em modelo físico bidimensional, mas realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Reis *et al.*, 2015).

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos, a que se adicionam as referências bibliográficas e os anexos.

No Capítulo 1 é feita a introdução e o enquadramento geral do tema em estudo referindo a sua relevância.

No Capítulo 2 apresenta-se a descrição do modelo numérico AMAZON, utilizado nesta dissertação.

No Capítulo 3 apresenta-se uma descrição dos fenómenos físicos mais importantes para os casos de estudo desta dissertação, concretamente a rebentação, espraçamento e reflexão, incluindo uma descrição das fórmulas empíricas de cálculo do espraçamento em praias.

No Capítulo 4 apresenta-se o primeiro caso de estudo, o espraçamento numa praia com perfil barra-fossa, salientando-se todos os passos que foram feitos na calibração do modelo AMAZON, assim como a análise de resultados.

No Capítulo 5 apresenta-se o segundo caso de estudo, a amplificação da agitação numa OWC-WEC, salientando-se todos os passos que foram feitos na calibração do modelo AMAZON, assim como a análise de resultados.

No Capítulo 6 é feita uma síntese dos resultados da dissertação e apresentadas as principais conclusões, terminando com sugestões de trabalho futuro.

2. Modelação numérica

2.1 Generalidades

O desenvolvimento progressivo da capacidade de cálculo dos computadores permitiu que, ao longo dos anos, os modelos numéricos tenham sido alvo de desenvolvimento, tornando-se sucessivamente mais fiáveis, sendo, em alguns casos, possível a sua utilização como uma ferramenta útil de apoio ao projeto de obras marítimas, de custo significativamente inferior à modelação física. Os modelos numéricos têm como principal vantagem o facto de exibirem grande flexibilidade tanto nas condições de agitação, como na geometria das estruturas em estudo. Para que as simulações realizadas sejam realistas, os modelos devem ter a capacidade de representar todos os fenómenos hidrodinâmicos relevantes e de modelar um número de ondas suficiente para gerar resultados consistentes (Reis & Neves, 2010).

No campo de estudo da interação entre a agitação marítima e as obras marítimas, é de destacar os modelos baseados na teoria da onda em condições de águas pouco profundas, NLSW (*NonLinear Shallow Water*) (e.g., Van Gent, 1994; Hu & Meyer, 2005; Reis & Neves, 2010; Reis *et al.*, 2008a,b, 2009a,b, 2011), os modelos RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) (e.g., Lin & Liu, 1998; Losada *et al.*, 2008; Higuera *et al.*, 2014a,b) e os modelos SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) (e.g., Dalrymple & Rogers, 2006; Didier & Neves, 2009; Didier *et al.*, 2013, 2014).

Alguns modelos recentes (RANS e SPH) e também mais completos têm limitações na aplicação prática a projetos de Engenharia, dado que o tempo de projeto é reduzido e dado que estes modelos têm um elevado tempo de cálculo e necessitam de calibração de determinadas características estruturais para cada caso de estudo, como por exemplo a porosidade dos mantos de quebra-mares (Neves *et al.*, 2008).

Os modelos baseados nas equações de águas pouco profundas, apesar de serem modelos simples e apresentarem algumas limitações relacionadas com as equações de base, possibilitam, em alguns casos, simulações realistas e rápidas (e.g., Van Gent, 1994; Dodd, 1998; Hu, 2000; Clarke *et al.*, 2004). Os seus campos de aplicação incluem o dimensionamento de estruturas marítimas galgáveis e a previsão de inundações, dado que permitem a simulação rápida de mais de 1000 ondas. Estes modelos têm sido validados fundamentalmente para estruturas impermeáveis (e.g., Dodd, 1998; Hu *et al.*, 2000; Hu & Meyer, 2005; Reis *et al.*, 2008a), para praias permeáveis (e.g., Van Gent, 1996; Clarke *et al.*, 2004) e ultimamente também para o estudo do galgamento de estruturas marítimas porosas (Reis & Neves, 2010; Reis *et al.*, 2008b, 2009a,b, 2011; Mariz *et al.*, 2012).

2.2 Modelo numérico AMAZON

O modelo AMAZON, originalmente desenvolvido em Manchester Metropolitan University, é um modelo numericamente muito estável e robusto que se baseia nas equações não lineares da teoria de onda em condições de águas pouco profundas, que resultam de uma simplificação das equações de Reynolds por integração na profundidade, admitindo que o fluido (água) é incompressível, isotrópico e Newtoniano. Assume-se que a pressão é hidrostática e despreza-se a aceleração vertical do escoamento, dado ser bastante menor do que a aceleração horizontal em pequenas profundidades. As equações descrevem movimentos de água em termos da profundidade de água total instantânea e a velocidade média de profundidade. As equações são resolvidas por um método de volumes finitos de alta resolução que é de 2ª ordem no tempo e no espaço.

O esquema de MUSCL-Hancock (Van Leer, 1979; Van Albada et al., 1982) empregado é um método de tipo Godunov que usa uma reconstrução monotônica das variáveis conservadas para obter valores em interfaces celulares que evitam oscilações espúrias na solução. Soluções para problemas locais de Riemann que são necessários para o estágio corretor são calculadas usando o HLL (Harten, Lax e Van Leer) resolutor aproximado de Riemann, capaz de captar ondas de macaréu (*bore waves*) e de simular fluxos supercríticos (Harten et al., 1983).

A implementação deste método no modelo permite a formulação de uma malha que pode adquirir formas (e.g., retangular, triangular e hexagonal) e dimensões variáveis, possibilitando gerar uma malha mais detalhada na zona de interesse do estudo e mais grosseira onde não seja necessário um cálculo tão preciso.

O modelo permite simular tanto ondas regulares como ondas irregulares, quer na versão unidimensional, utilizada nesta dissertação, como na versão bidimensional, e a rebentação é simulada com o conceito de macaréu (*tidal bore*) (Hu, 2000).

Na fronteira de entrada do modelo, o AMAZON incorpora um método numérico de absorção de ondas refletidas que permite absorver mais de 98% das ondas refletidas pela estrutura. Tal permite colocar a fronteira de entrada próxima da estrutura, evitando a modelação desde águas profundas, onde o modelo tem limitações, dado basear-se na resolução das equações NLSW. Segundo Hu & Meyer (2005) e para otimização dos resultados, a fronteira de entrada deverá ser colocada a, aproximadamente, um comprimento de onda do pé da estrutura, L_0 , dado pela expressão (2.1):

$$L_0 = gT_p^2/2\pi \quad (2.1)$$

em que g é a aceleração da gravidade e T_p o período de pico do espectro incidente.

Dado que o modelo se baseia em equações NLSW deve verificar-se que as condições são de águas pouco profundas ($d < L_0/20$, sendo d a profundidade existente no domínio de cálculo). É necessário ainda verificar-se se d/L_0 está compreendido no intervalo entre 0.016 e

0.19 (Pullen & Allsop, 2003), devendo considerar-se d , para esta verificação, a profundidade na fronteira de entrada do modelo.

O modelo permite considerar estruturas com várias configurações, como estruturas verticais (ou quase verticais) e em talude (com ou sem berma, com ou sem superestrutura), embora, por ser um modelo integrado em profundidade, não permita modelar a parte deflectora de um muro-cortina e utilize um artifício para representar estruturas verticais (Hu, 2000).

O modelo AMAZON já foi usado e validado em diferentes casos de estudo com bons resultados (Hu *et al.*, 2000) envolvendo escoamentos permanentes e não permanentes, viscosos e não-viscosos e ainda subcríticos e supercríticos. Tem sido também validado e extensivamente utilizado no estudo do galgamento de estruturas impermeáveis (e.g., Neves *et al.*, 2010), pois apenas permitia a consideração do efeito da porosidade através do recurso a uma dissipação artificial de energia, recorrendo a um parâmetro de atrito de fundo (coeficiente de Chézy) (Hu, 2000). Desde 2007, o modelo tem vindo a ser desenvolvido para estruturas porosas pelo LNEC em colaboração com a Royal HaskoningDHV do Reino Unido, onde trabalha o autor do modelo, tendo sido também objeto de validação (Reis & Neves, 2010; Reis *et al.*, 2008b, 2009a,b, 2011; Mariz *et al.*, 2012). No entanto, não o foi para estruturas verticais de conversão de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante, nem para certas condições de espraçamento em praias. É neste âmbito de colaboração que se enquadra o trabalho desta dissertação.

O AMAZON foi desenvolvido na linguagem de programação C++ e tem uma interface bastante agradável e fácil de usar (Anexo A). Como dados de entrada, o modelo necessita dos seguintes elementos:

- Perfil da estrutura/praias;
- Batimetria dos fundos adjacentes;
- Características da camada porosa, caso exista: geometria, porosidade, diâmetro nominal do material constituinte e coeficientes de porosidade;
- Parâmetro de atrito de fundo (pode variar ao longo da estrutura e da batimetria);
- Nível do mar, que pode variar (adotando uma curva sinusoidal de maré ou uma série temporal definida pelo utilizador);
- Agitação incidente: o modelo permite a escolha de ondas sinusoidais ou de ondas irregulares definidas por um espectro empírico (e.g., JONSWAP, Pierson-Moskowitz) ou por um espectro definido pelo utilizador, ou ainda a introdução de uma série incidente proveniente, por exemplo, de modelação numérica ou de ensaios de modelo físico reduzido;
- Malha (uniforme/não uniforme, discretização);
- Outros parâmetros (e.g. profundidade mínima molhada).

A calibração do modelo AMAZON para os casos de estudo da presente dissertação consistiu numa análise de sensibilidade de quatro parâmetros: Profundidade Mínima Molhada,

Profundidade Mínima de Atrito, Atrito de Fundo e variável n . A profundidade mínima molhada é a profundidade limite (mínima) para a qual uma célula computacional é considerada seca. A profundidade mínima de atrito é utilizada para calcular uma perda de atrito equivalente quando a profundidade da água é muito pequena. Neste caso, o atrito de fundo, que representa a perda de energia devido a turbulência e atrito no perfil da estrutura e/ou no fundo, pode tornar-se muito grande em relação à velocidade, sendo necessário introduzir uma profundidade mínima de atrito. O parâmetro n é um fator de calibração da barreira vertical existente no caso de estruturas OWC-WEC, que tem em conta a energia que passa esta barreira.

O modelo AMAZON permite obter, como resultados, séries temporais da elevação da superfície livre em vários pontos do domínio, velocidades integradas na vertical e, através destas, caudais instantâneos e caudais médios de galgamento em vários pontos da estrutura. A descrição detalhada do modelo pode ser consultada em Hu (2000) e Reis *et al.* (2008b, 2009a,b, 2011).

3. Fenómenos físicos das ondas

3.1 Características das ondas

A superfície do mar na zona de geração das ondas apresenta uma configuração complexa, irregular e variável de instante para instante, sendo que a sua oscilação é afetada por fenómenos de alteração das ondas na sua propagação em direção à costa. As ondas observáveis no mar são ondas irregulares, que podem ser consideradas como um conjunto infinito de ondas de diferentes amplitudes e períodos, com direções múltiplas. Estas ondas podem ser descritas como sendo uma soma de ondas regulares, com altura e período constantes no tempo. A sua análise é feita recorrendo a métodos estatísticos ou por análise espectral. No âmbito da presente dissertação só serão estudadas ondas regulares.

Uma onda regular é definida por uma função sinusoidal e apresenta uma oscilação uniforme e periódica da elevação da superfície livre com determinadas características, tais como:

- Período de onda (T): Tempo que decorre entre a passagem de dois pontos idênticos da superfície livre, por exemplo, entre duas cavas ou duas cristas;
- Comprimento de onda (L): Distância entre dois pontos idênticos sucessivos da superfície livre;
- Altura de onda (H): Distância vertical entre a crista e a cava da onda;
- Amplitude da crista (A_c): Distância vertical máxima entre o nível de repouso da água (NR) e a crista;
- Amplitude da cava (A_s): Distância vertical máxima entre o nível de repouso e a cava;
- Elevação da superfície livre da água (η): Distância entre o nível de repouso da água e a superfície livre da mesma num dado instante.

Com base nessas características, podem-se definir parâmetros adimensionais:

- Declividade da onda (H/L): Quociente entre a altura da onda e o seu comprimento; indica a variação do movimento vertical da onda num comprimento de onda;
- Profundidade relativa (h/L): Quociente entre a profundidade, h (distância entre o nível de repouso da água e o fundo), e o comprimento da onda; é uma medida de dispersividade das ondas, ao indicar se a velocidade de propagação das ondas está ou não afetada pelo período das mesmas;
- Altura relativa (H/h): Quociente entre a altura da onda e a profundidade; indica a importância da oscilação vertical da onda na profundidade.

Na Figura 3.1 apresentam-se algumas destas definições.

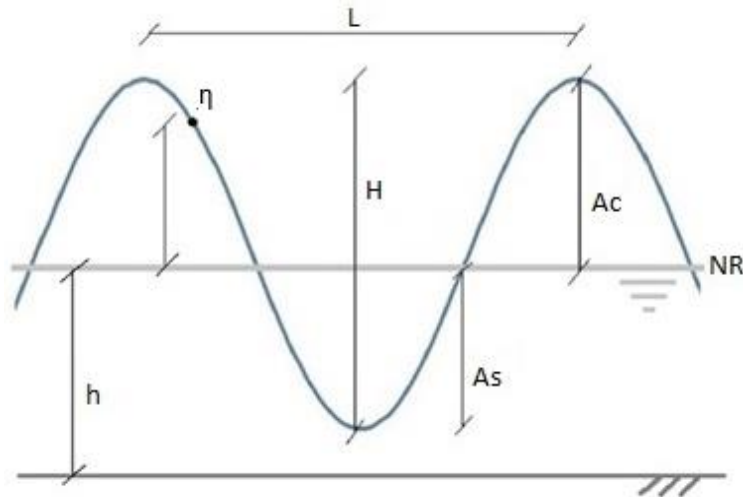


Figura 3.1 – Algumas características das ondas.

A celeridade, c , de uma onda é a velocidade com que esta se propaga e calcula-se através da seguinte equação:

$$c = L/T \quad (3.1)$$

A celeridade de uma onda pode ser também calculada, considerando válida a teoria linear das ondas, usando a equação da dispersão, dada por (USACE, 2006):

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \quad (3.2)$$

Dependendo da profundidade relativa, esta equação pode ser simplificada, como se mostra na Figura 3.2, apresentando-se três fórmulas para o cálculo da celeridade, obtidas a partir da equação (3.2) para as diferentes profundidades, h .

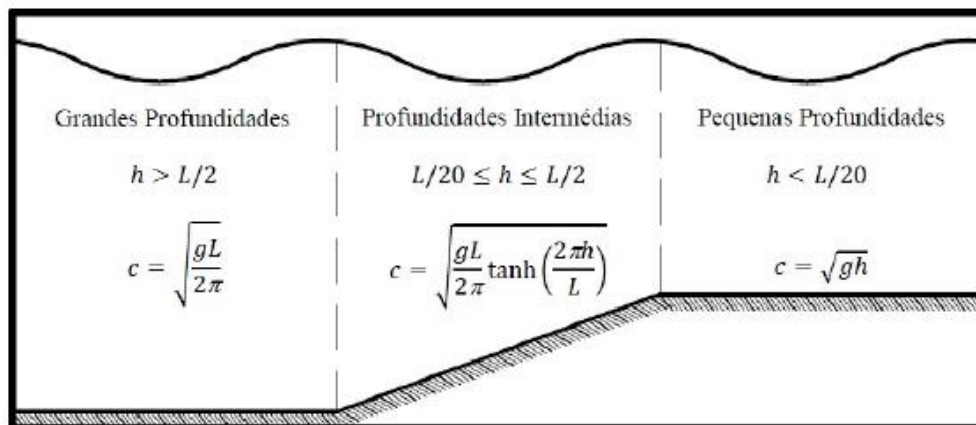


Figura 3.2 – Equações da celeridade para diferentes profundidades da zona de propagação (USACE, 2006).

3.2 Rebentação

As ondas, ao aproximarem-se da costa, aumentam de inclinação à medida que a profundidade diminui. Na propagação da onda para zonas menos profundas, o atrito do fundo torna mais lento o movimento orbital da onda junto ao fundo, mantendo a parte superior a sua velocidade inicial. Quando a inclinação da onda atinge um valor limite, que é função da profundidade relativa h/L , a onda rebenta, dissipando energia, induzindo correntes perto da costa e um aumento significativo no nível da água.

Dependendo da inclinação do talude (α) onde a onda se propaga com a horizontal e da declividade da onda, o tipo de rebentação tomará diferentes formas, que podem ser caracterizadas através do parâmetro de rebentação, ou Número de Iribarren (ξ), que se define pela expressão (3.3):

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \quad (3.3)$$

De notar que o Número de Iribarren não entra em conta com o ângulo de incidência das ondas. Importa referir que este parâmetro constitui um importante auxiliar em muitos caso de estudo de engenharia costeira, relacionados com o cálculo da reflexão da onda, com o espraio e com o galgamento. A rebentação da onda classifica-se segundo os seguintes tipos:

- Rebentação progressiva (*spilling*) – ($\xi < 0.5$) a crista deforma-se e destabiliza-se, criando uma leve espuma sobre o talude; ocorre mais frequentemente em taludes mais suaves;



Figura 3.3 – Rebentação progressiva (*spilling*) (USACE, 2006).

- Rebentação mergulhante (*plunging*) – ($0.5 < \xi < 3$) a crista da onda cria uma curvatura e cai sobre o talude originando grandes salpicos;

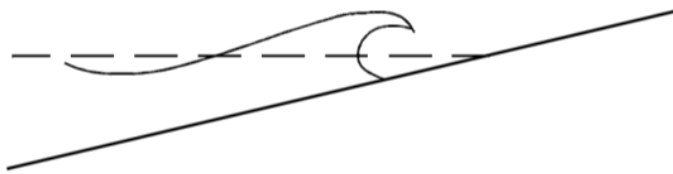


Figura 3.4 – Rebentação mergulhante (*plunging*) (USACE, 2006).

- Rebentação colapsante (*collapsing*) – ($3 < \xi < 3.5$) a crista não rebenta inteiramente, não originando grandes salpicos, mas cria-se uma espuma que se estende pelo talude;

este tipo pode surgir pela sobreposição dos dois tipos de rebentação anteriormente descritos;

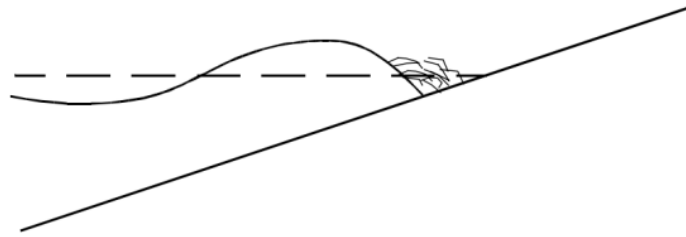


Figura 3.5 – Rebentação colapsante (*collapsing*) (USACE, 2006).

- Rebentação de fundo (*surging*) – ($\xi > 3.5$) no caso da onda apresentar pouca declividade, esta espraia-se sobre o talude sem rebentar; estas ondas são caracterizadas por terem uma forte reflexão.

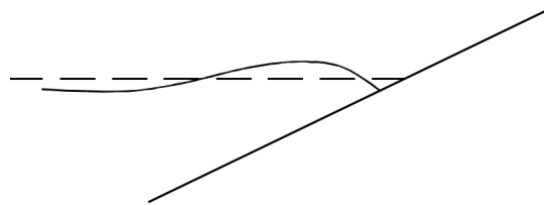


Figura 3.6 – Rebentação de fundo (*surging*) (USACE, 2006).

A rebentação de ondas é ainda o fenómeno responsável pela geração das correntes litorais e pela modificação do nível médio da superfície livre, com formação de sobrelevação positiva (*wave setup*) e negativa (*wave set-down*).

3.3 Espraçamento

Uma onda, ao rebentar sobre um talude, sobe e desce sobre o mesmo, dando origem ao espraçamento (*Run-up*) e ao refluxo (*Run-down*) (Figura 3.7). O espraçamento é a diferença entre a cota máxima atingida pela onda e o nível de repouso da água e o refluxo é a diferença entre a cota mínima atingida pela onda e o nível de repouso da água.

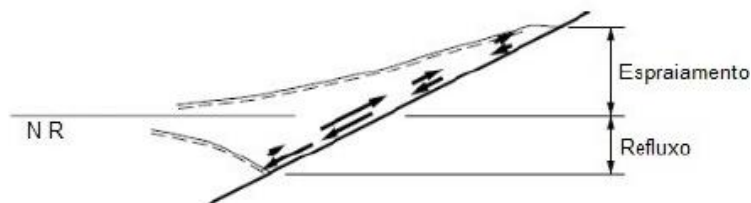


Figura 3.7 – Espraçamento e refluxo (adaptado de USACE, 2006).

Em geral, o espraçamento depende da altura da onda, do seu período e da interação da onda incidente com a onda refletida pelo talude, como também de outras características como a inclinação do talude, rugosidade, permeabilidade e porosidade (USACE, 2006).

Ao longo das últimas décadas foram estudadas e publicadas várias fórmulas empíricas de cálculo, de forma aproximada, do espraçamento, e ainda hoje muitas são utilizadas como uma ferramenta expedita de auxílio ao projeto de estruturas marítimas, embora tais formulações sejam de aplicação limitada, já que são baseadas em ensaios experimentais para condições muito específicas de agitação, nível de água e inclinação de talude.

Com base em ensaios laboratoriais, Hunt (1959) propôs uma fórmula para o cálculo do espraçamento, R , (sem o *setup* das ondas incluído) para ondas regulares e taludes impermeáveis contínuos, dada por:

$$R = 0.4 \tan \alpha T \sqrt{gH} ; \text{ com } \sqrt{\frac{H}{T^2}} > \tan \alpha; H \approx H_0; \alpha < 45^\circ \quad (3.4)$$

$$R = 3H; \text{ com } \sqrt{\frac{H}{T^2}} < \tan \alpha; H \approx H_0; \alpha \geq 45^\circ \quad (3.5)$$

sendo H_0 a altura de onda ao largo (junto ao gerador de ondas).

Holman (1986), com base em dados de campo (praias de areia), propôs uma fórmula para o cálculo do espraçamento excedido apenas por 2% de todos os espraçamentos, $R_{2\%}$, dada por:

$$R_{2\%} = H_0 (0.83\xi_0 + 0.2) \text{ (com características da agitação ao largo)} \quad (3.6)$$

$$R_{2\%} = H_s (0.78\xi_s + 0.2) \text{ (com características da agitação no pé do talude)} \quad (3.7)$$

sendo H_0 a altura significativa de onda ao largo, ξ_0 o Número de Iribarren ao largo calculado usando o período de pico do espectro, T_p , H_s a altura significativa de onda incidente e ξ_s o Número de Iribarren determinado usando o comprimento de onda ao largo calculado com o período significativo de onda incidente, T_s .

Nielsen e Hanslow (1991), com base em dados de campo em praias de areia, propuseram uma fórmula para o cálculo do espraçamento, dada por:

$$R_{2\%} = 0.6 * \tan \alpha \sqrt{(-\ln 0.02) * H_{orms} * L_0}; \text{ com } \tan \alpha \geq 0.1 \quad (3.8)$$

$$R_{2\%} = 0.05 * \sqrt{(-\ln 0.02) * H_{orms} * L_0}; \text{ com } \tan \alpha < 0.1 \quad (3.9)$$

sendo α a inclinação da face da praia, L_0 o comprimento de onda ao largo associado ao período significativo e H_{orms} a altura média quadrática de onda em águas profundas (ao largo) (Matias *et al.*, 2012), dada pela expressão 3.10:

$$H_{orms} = H_s / \sqrt{2} \quad (3.10)$$

sendo H_s a altura significativa de onda em águas profundas.

Ruggiero *et al.* (2001), com base em dados de campo em praias de areia, propuseram uma fórmula para o cálculo de $R_{2\%}$, dada por:

$$R_{2\%} = 0.5H_0 - 0.22; \text{ para praias dissipativas} \quad (3.11)$$

$$R_{2\%} = 0.27\sqrt{\tan \alpha * H_0 * L_0}; \text{ para praias refletivas} \quad (3.12)$$

sendo L_0 o comprimento de onda ao largo associado ao período de pico do espetro.

Stockdon *et al.* (2006) propuseram a seguinte expressão para $R_{2\%}$ para praias de areia dissipativas:

$$R_{2\%} = 0.043\sqrt{H_0 * L_0} \text{ para } \xi < 0.3 \quad (3.13)$$

$$R_{2\%} = 1.1 * [0.35 \tan \alpha * \sqrt{H_0 * L_0} + \sqrt{H_0 * L_0 (0.563(\tan \alpha)^2 + 0.004)/2}] \text{ para } \xi \geq 0.3 \quad (3.14)$$

sendo L_0 o comprimento de onda ao largo associado ao período de pico do espetro.

Teixeira (2009), com base em dados de campo em praias de areia no Algarve, propôs duas fórmulas para o cálculo do espraio máximo, $R_{\text{máx}}$ (valor máximo observado dos espraioes que ocorrem para uma dada tempestade), dadas por:

$$R_{\text{máx}} = 0.08 * H_s + 0.62 \quad (\text{mais antiga}) \quad (3.15)$$

$$R_{\text{máx}} = 1.08 * H_s * \xi_0 \quad (\text{mais recente}) \quad (3.16)$$

sendo H_s a altura significativa de onda em águas profundas e ξ_0 o Número de Iribarren ao largo associado ao período máximo, $T_{\text{máx}}$.

Como se pode observar, existe um desenvolvimento das fórmulas empíricas ao longo do tempo por parte de vários autores no sentido de se obter, de uma forma rápida e expedita, valores teóricos cada vez mais precisos, e que podem ser úteis nas fases iniciais de projeto. No entanto, dado tais formulações serem baseadas em ensaios para condições específicas, espera-se que apresentem um erro maior do que resultados de um modelo numérico ou de um modelo físico, ambos muito mais indicados na conceção final de projetos de estruturas marítimas. A maioria destas fórmulas foi desenvolvida com base em dados obtidos em praias e dependem essencialmente das características da agitação marítima e do declive do talude onde se dá o espraio.

3.4 Reflexão

A reflexão é o fenómeno que, em 2D, se verifica quando uma onda, ao atingir um obstáculo ou linha da costa, se propaga em sentido oposto à onda incidente, ambas de igual período.

A reflexão tem um papel muito importante na acalmia no interior de portos e é determinante para garantir as suas condições de utilização, tendo também influência nas áreas costeiras envolventes.

Normalmente a reflexão é quantificada através do coeficiente de reflexão, K_r , dado pela expressão 3.17:

$$K_r = H_r / H_i \quad (3.17)$$

sendo H_i a altura de onda incidente e H_r a altura de onda refletida.

O coeficiente de reflexão depende das características do perfil refletor, tais como a inclinação do talude do perfil, a sua rugosidade e porosidade. O coeficiente de reflexão também depende das características das ondas, tais como a altura de onda, período e comprimento de onda. Para uma praia natural, os valores do coeficiente de reflexão são da ordem de 0.05 – 0.2.

Existem diferentes métodos de separação de ondas incidentes e refletidas com base em séries temporais da elevação da superfície livre em dois ou mais pontos. O mais utilizado é o de Mansard e Funke (1980). Este método propõe uma metodologia para a decomposição do espectro de variância em espectros incidente e refletido, obtido a partir de séries temporais de elevação da superfície livre recolhidas em três pontos (ou sondas). As três sondas devem estar colocadas a uma distância relativamente pequena entre si e dispostas num plano perpendicular à direção principal de propagação da agitação. Existem indicações na literatura que recomendam as seguintes relações:

- $x_{12} \cong L/10$
- $L/6 \leq x_{13} \leq L/3$
- $x_{12} \neq m x_{13}$

onde x_{ij} é a distância entre a sonda i e a sonda j (Figura 3.8) e m é um número inteiro.

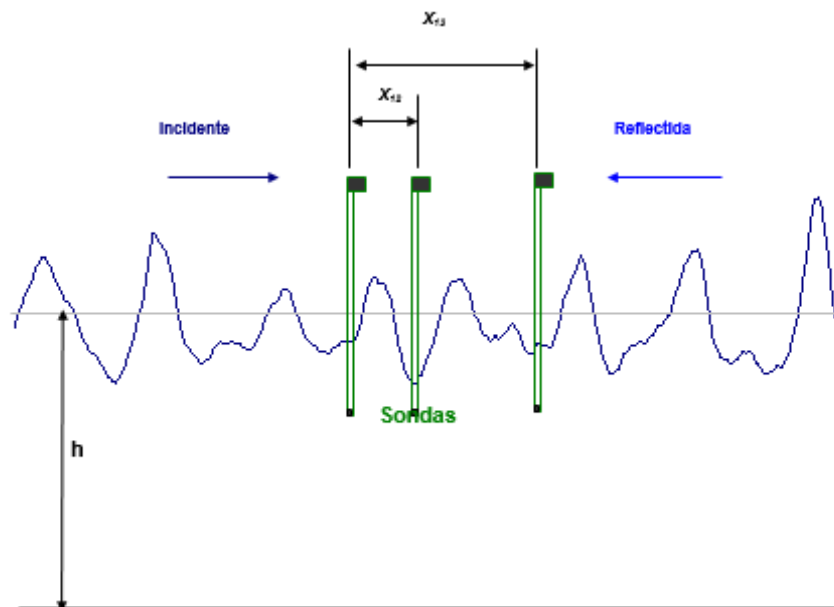


Figura 3.8 – Esquema para utilização do método de separação das ondas incidente e refletida.

Esta metodologia permite separar os espectros incidente e refletido, assim como as respectivas séries, assumindo as seguintes simplificações:

- A agitação irregular é descrita pela sobreposição linear de um número infinito de componentes espectrais harmónicas discretas, com fase, amplitude e frequências próprias;
- Estas componentes propagam-se com velocidades de fase individuais, descritas pela relação de dispersão, obtida da teoria linear da onda.

Apesar do método de Mansard e Funke (1980) originalmente ter sido desenvolvido para aplicações com sondas colocadas em posições de profundidade constante, Baquerizo (1995) adaptou o método a casos de profundidade variável. Esta adaptação consiste em utilizar as diferentes profundidades da posição das sondas com consequente cálculo, diferenciado, dos números de onda em cada posição.

4. Caso de estudo 1 – Espraçamento e reflexão numa praia com perfil barra-fossa

4.1 Descrição do caso de estudo

O primeiro caso de validação do modelo AMAZON consiste no estudo do espraçamento numa praia barra-fossa cujas condições de batimetria, nível da água e condições de agitação marítima inseridas no AMAZON correspondem às de ensaios em modelo físico realizados anteriormente à escala 1:5 (Sancho, SPANWAVE II).

Os ensaios foram realizados na Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, no canal de ondas CIEM (Canal de Investigação e Experimentação Marítima), cujas dimensões são: 100m de comprimento, 3m de largura e 5m de profundidade. Para simular uma praia, o canal foi preenchido com areia compacta desde do fundo até um nível definido, sendo depois aplicado por cima da areia um betão leve (Figura 4.1). A superfície final ficou como uma camada de argamassa não alisada com rugosidade parecida ao de grãos de areia grossos (Figura 4.2).

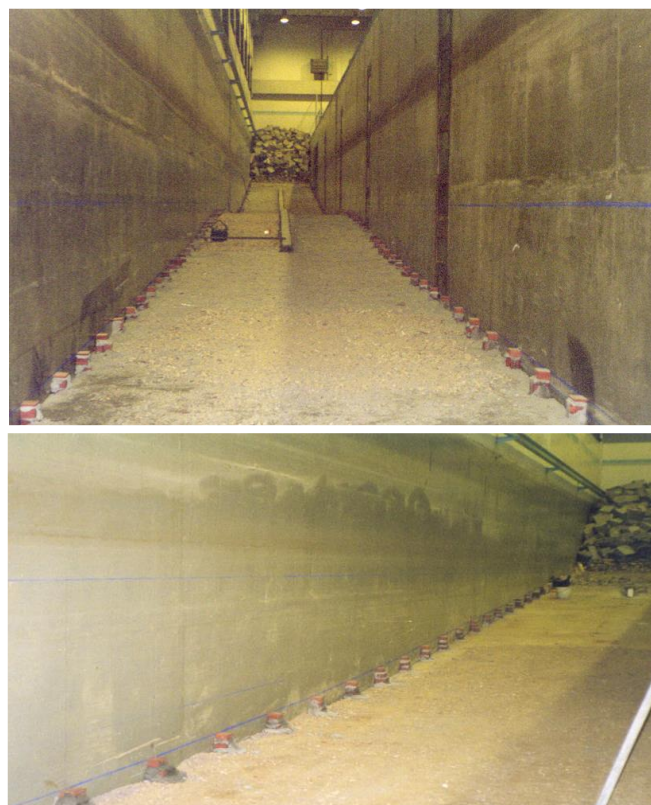


Figura 4.1 – Vista em perspetiva do canal de ondas e perfil da praia em construção (Sancho, SPANWAVE II).



Figura 4.2 – Vista da superfície final do fundo e sua rugosidade (Sancho, SPANWAVE II).

O perfil longitudinal do fundo do canal é representado na Figura 4.3 e as ondas propagam-se da esquerda para a direita, estando o gerador de ondas posicionado em $x=0\text{m}$.

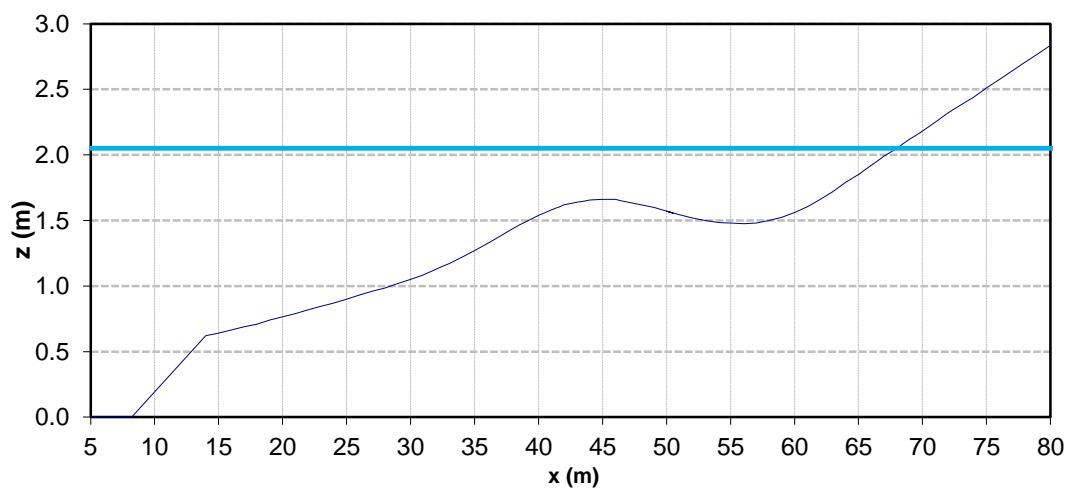


Figura 4.3 – Vista longitudinal do fundo do canal de ondas.

Ao longo do centro do canal foi construída uma pequena trincheira de modo a acomodar alguns instrumentos de medição. A trincheira era oca e foi coberta por placas de PVC (14x100cm) com parafusos anexáveis, podendo assim ser removidas facilmente para colocação dos instrumentos dentro da trincheira (Figura 4.4).

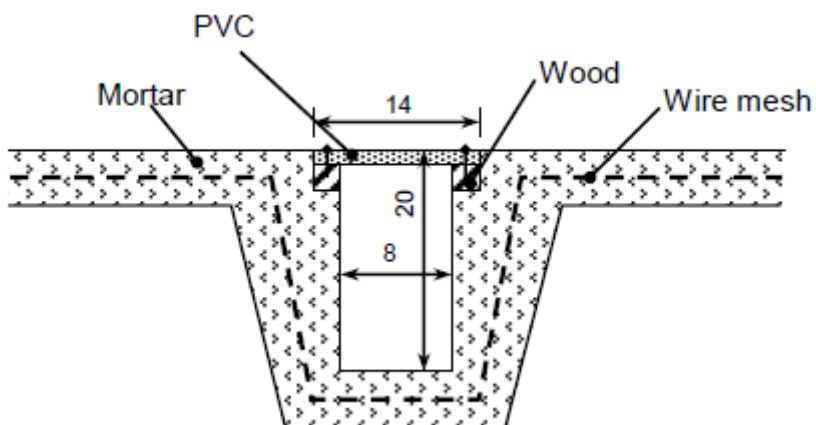


Figura 4.4 – Vista transversal do canal de ondas (Sancho, SPANWAVE II).

O gerador de ondas hidráulico é composto por uma pá de tipo cunha construída em material de alumínio. Esta pá desliza de cima a baixo num plano inclinado em 30° (Figura 4.5). O gerador de ondas é controlado por um sistema de absorção-geração de ondas baseado em computador, capaz de eliminar as re-reflexões das ondas geradas pela pá.



Figura 4.5 – Vistas do gerador de ondas (Sancho, SPANWAVE II).

As condições de agitação simuladas nos ensaios foram escolhidas de tal modo que simulassem as medições no protótipo sobre uma praia de fundo fixo semelhante a um perfil próximo do equilíbrio. Foram escolhidas quatro condições de agitação, de modo a que estas rebentassem primeiro no talude da barra e, em segundo lugar, mais perto da costa. Os ensaios

foram repetidos várias vezes para cada uma das quatro condições de agitação, dando origem a 230 testes.

O Quadro 4.1 resume as características das quatro condições de agitação testadas, em que H_{rms} é a altura média quadrática de onda (em frente ao gerador de ondas), x_b , H_b e h_b são, respetivamente, o local, a altura e a profundidade de rebentação. Na Figura 4.6 é possível observar o local de rebentação de um ensaio com as condições de agitação A, B e C.

Quadro 4.1 – Resumo dos parâmetros dos ensaios (Sancho, SPANWAVE II).

Tipo de onda	H, H_{rms} (m)	T, T_p (s)	H/L (-)	Nº Ursell, $H/L/(h/L)^3$ (-)	x_b (m)	H_b (m)	h_b (m)	Tipo de rebentação
A (regular)	0.208	2.47	0.02	1.890	40.500	0.300	0.393	Progressiva
B (regular)	0.208	3.48	0.02	4.710	42.000	0.350	0.410	Mergulhante
C (regular)	0.391	3.48	0.03	8.520	46.570	0.560	0.585	Mergulhante
D (irregular)	0.194	2.49	0.02	1.890	45.000	0.232	0.510	Ambas



Figura 4.6 – Imagens do local de rebentação para as ondas tipo A, B e C (de cima para baixo, respetivamente) (Sancho, SPANWAVE II).

No âmbito da presente dissertação, apenas os ensaios com ondas regulares serão alvo de estudo (ondas tipo A, B e C). As ondas tipo A e B foram escolhidas de modo a terem igual altura de onda, mas diferente período, dando origem a tipos de rebentação diferentes (progressiva e mergulhante). As ondas tipo B e C têm diferentes alturas de onda, mas períodos iguais. As ondas tipo A e C têm diferentes alturas de onda e períodos, mas declividades de onda (H/L) quase iguais em frente ao gerador de ondas. Assim, a escolha cuidada dos parâmetros representativos das ondas permitiu obter uma variedade de condições de agitação, mas com propriedades comparáveis.

A elevação da superfície livre foi registada por sondas localizadas num total de 49 locais diferentes ao longo do canal (Figura 4.7), com uma combinação de até 8 locais de medição por ensaio. Havia 6 sondas com um metro de comprimento (Figura 4.8) e 3 com 2.5m de comprimento, as últimas especialmente construídas para medir as condições de agitação perto da costa, estando uma delas montada, em alguns ensaios, na parte inferior do talude da praia de modo a permitir medir o espraio (Figura 4.9).

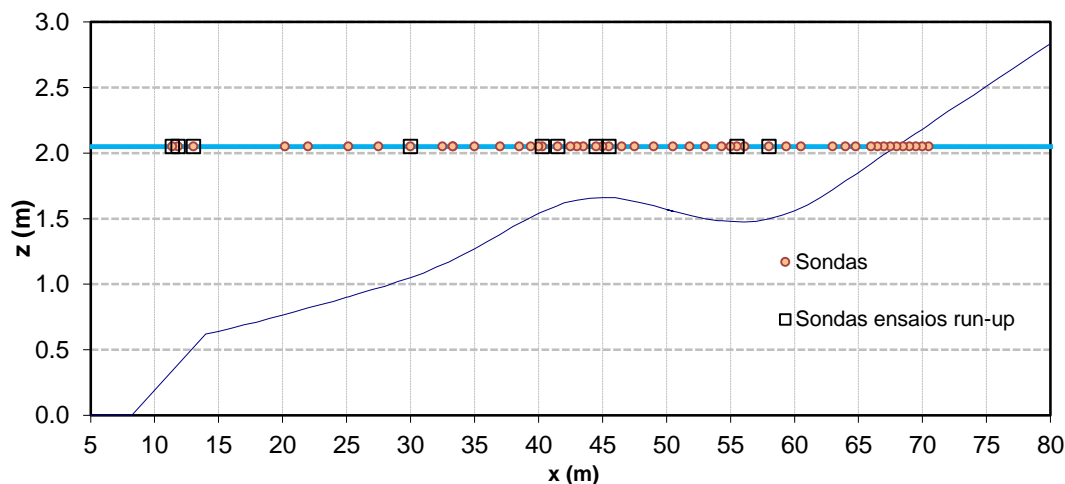


Figura 4.7 – Localização das sondas ao longo do canal.

Três sondas permaneceram em posições fixas todo o tempo dos ensaios, em frente ao gerador de ondas, ou seja, em $x=11.40m$, $x=11.85m$ e $x=13.05m$, de modo a permitir verificar a repetibilidade e controle dos ensaios. As outras sondas foram deslocadas longitudinalmente ao longo do canal, de um teste para o outro, a fim de obter informação das ondas em diferentes posições.

Os dados de elevação da superfície livre foram analisados de modo a produzir, principalmente, estatísticas de altura de onda e o deslocamento médio da superfície livre (*setup/set-down*). Em geral, as sondas funcionaram bastante bem.

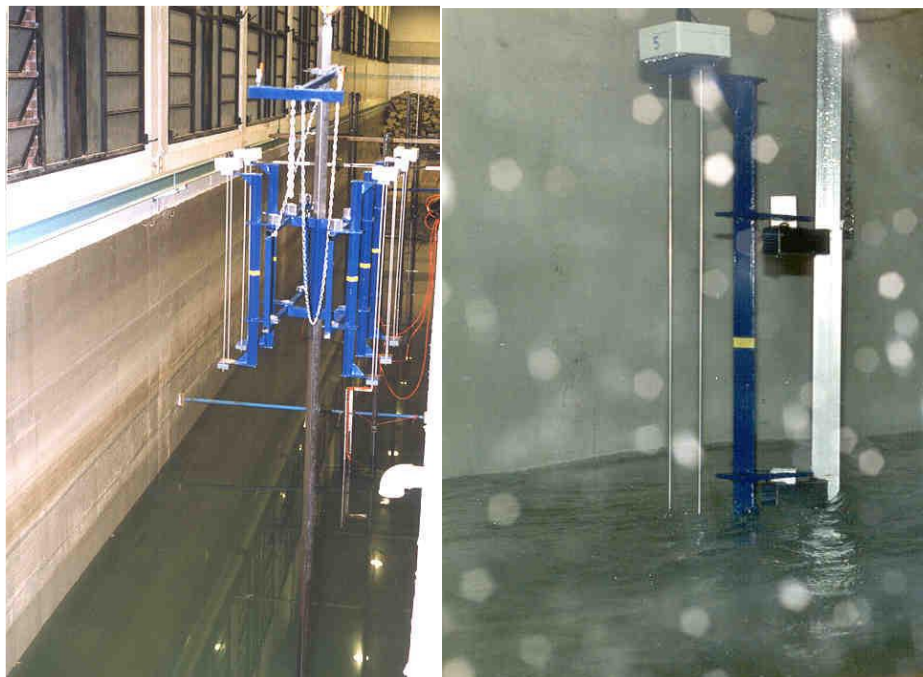


Figura 4.8 – Sondas com 1m de comprimento, durante a calibração e durante os ensaios (Sancho, SPANWAVE II).



Figura 4.9 – Sonda de medição do espalhamento, com 2.5m de comprimento (Sancho, SPANWAVE II).

4.2 Aplicação de fórmulas empíricas de espraçamento

Como mencionado na secção 3.3, existem diversas fórmulas empíricas de cálculo do espraçamento, publicadas ao longo das últimas décadas, que são baseadas em ensaios experimentais para condições muito específicas. A título de exemplo, os Quadros 4.2 e 4.3 apresentam os resultados e erros relativos aos valores dos ensaios em modelo físico, respetivamente, de algumas dessas fórmulas para as ondas tipo A, B e C do caso de estudo.

Quadro 4.2 – Comparação de valores de espraçamento médio, R_{med} , obtidos pelas fórmulas empíricas e nos ensaios em modelo físico.

Tipo de onda	R_{med} (m)						
	Hunt (1959)	Holman (1986)	Nielsen e Hanslow (1991)	Ruggiero <i>et al.</i> (2001)	Stockdon <i>et al.</i> (2006)	Teixeira (2009)	Ensaios físicos
A	0.0942	0.0522	0.0598	0.0421	0.0423	0.0401	0.0475
B	0.1326	0.0610	0.0756	0.0533	0.0535	0.0507	0.0697
C	0.1819	0.0944	0.1059	0.0746	0.0750	0.0710	0.1014

Quadro 4.3 – Erros obtidos pelas fórmulas empíricas em relação aos ensaios em modelo físico.

Tipo de onda	Erros (%)					
	Hunt (1959)	Holman (1986)	Nielsen e Hanslow (1991)	Ruggiero <i>et al.</i> (2001)	Stockdon <i>et al.</i> (2006)	Teixeira (2009)
A	98.3%	9.8%	25.8%	-11.3%	-10.9%	-15.6%
B	90.4%	-12.5%	8.4%	-23.6%	-23.2%	-27.3%
C	79.4%	-6.9%	4.4%	-26.4%	-26.1%	-30.0%

Como se pode observar, as diversas fórmulas empíricas apresentam um desvio significativo do espraçamento medido nos ensaios experimentais, como era de esperar, pois são fórmulas de cálculo expeditas. Com exceção das fórmulas de Hunt (1959) e Nielson e Hanslow (1991), as fórmulas apresentam valores de espraçamento por defeito. A fórmula que apresenta globalmente melhores resultados é a fórmula de Nielson e Hanslow (1991),

4.3 Aplicação do modelo AMAZON

4.3.1 Análise de sensibilidade aos parâmetros do modelo

De modo a se obterem valores de espraçamento fiáveis e o mais próximo possível dos valores provenientes dos ensaios em modelo físico com ondas regulares, o modelo numérico AMAZON necessita de ser calibrado convenientemente.

Para o caso de estudo da praia com perfil barra-fossa, inseriu-se no modelo AMAZON o perfil dos ensaios (Figura 4.3), as condições de agitação (altura de onda e período) da onda tipo A (Quadro 4.1) e o nível da água (2.05m).

Outros valores de entrada também necessários no modelo AMAZON são a dimensão da malha computacional (que pode variar), o número de ondas simulado e o número de ondas para aquecimento (*warming up time*). Para definir a dimensão da malha computacional, analisaram-se 5 malhas de dimensão constante para todos os casos: malha de 0.02m, de 0.016m, de 0.012m, de 0.008m e de 0.004m, ou seja, começou por se analisar uma malha mais grosseira (malha de 0.02m) e foi-se diminuindo a sua dimensão, até uma malha mais fina (malha de 0.004m). Para definir o número de ondas a simular, inicialmente optou-se por utilizar 100 ondas, mas verificou-se em corridas teste que o modelo AMAZON estava com tempos de execução muito elevados. Por isso, e uma vez que se tratam de ondas regulares, optou-se por simular 60 ondas. Para o número de ondas de aquecimento adotaram-se 5 ondas.

Apesar de nos ensaios em modelo físico ter sido utilizado um número limitado de sondas, o modelo numérico AMAZON permite obter resultados em vários pontos do perfil devido ao vasto número de sondas que se podem inserir no modelo (mais de 1000 sondas). Assim, inicialmente inseriram-se no modelo 156 sondas, tendo a preocupação de as sondas terem um espaçamento mais reduzido em grande parte do perfil, especialmente desde da zona de rebentação até à zona de espraio (Figura 4.10 e Quadro 4.4).

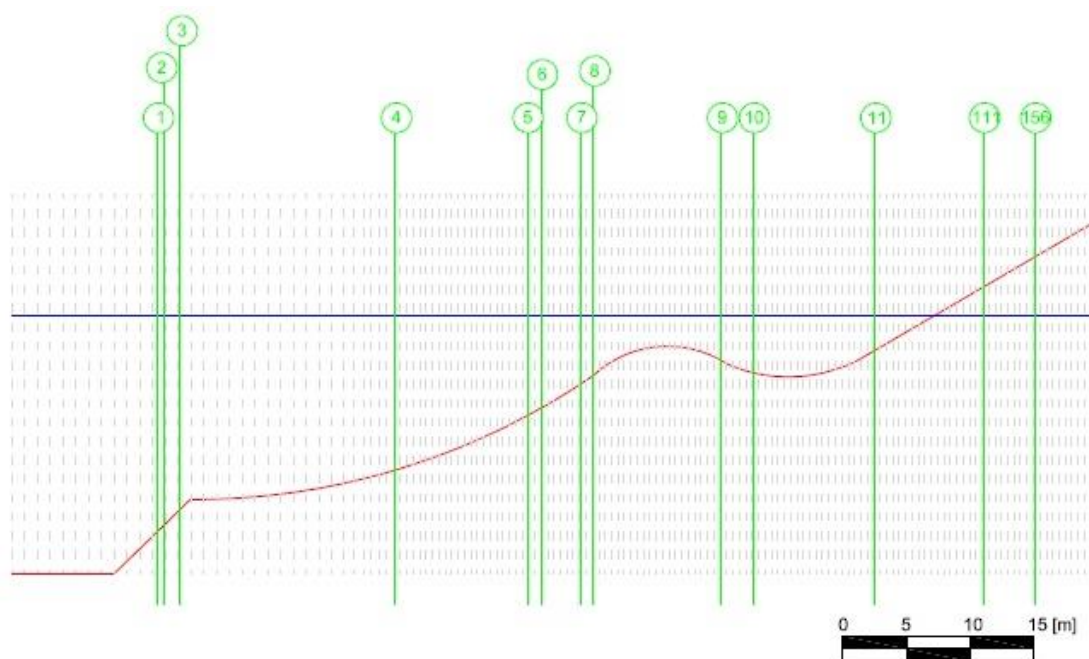


Figura 4.10 - Representação esquemática da discretização da malha computacional utilizada (a cinzento), da praia (a vermelho), do nível de água em repouso (a azul) e da localização das secções de medição (a verde), em protótipo.

Quadro 4.4 – Coordenadas das sondas iniciais inseridas no modelo AMAZON.

Sonda nº	Coordenada x AMAZON (m)
1	11.4
2	11.85
3	13.05
4	30
5	40.3
6	41.5
7	44.5
8	45.5
9	55.5
10	58
11	67.5
11<sondas<111	afastamento de 0.8m
111	75.5
111<sondas<156	afastamento de 1.0m
156	80

As sondas 111 a 156 foram usadas no cálculo do espriamento, que foi obtido considerando a distância entre o nível médio da água em repouso e a posição, na vertical, correspondente à última sonda que se encontrava molhada.

Seguidamente, iniciou-se a análise da sensibilidade dos resultados do AMAZON aos seus parâmetros principais de calibração para o caso de estudo: Profundidade Mínima Molhada, Profundidade Mínima de Atrito e Atrito de Fundo. Inicialmente adotaram-se os valores pré-definidos de Profundidade Mínima de Atrito e Atrito de Fundo, e fez-se variar a Profundidade Mínima Molhada (Quadro 4.5).

Quadro 4.5 – Onda tipo A - Análise de sensibilidade à Profundidade Mínima Molhada (Profundidade Mínima de Atrito=0.1m, Atrito de Fundo=10⁻⁶).

Profundidade Mínima Molhada (m)	Espriamento (m)				
	Malha 0.020m	Malha 0.016m	Malha 0.012m	Malha 0.008m	Malha 0.004m
10 ⁻³	0.0438	-	0.1902	0.0824	0.1171
10 ⁻⁴	0.0456	0.0952	0.0539	0.0516	0.0544
10 ⁻⁵	0.0445	0.0952	0.0602	0.0546	0.0546
10 ⁻⁶	0.0445	0.0952	0.0602	0.0544	0.0546
10 ⁻⁷	0.0445	0.0952	0.0602	0.0544	0.0546
10 ⁻⁸	0.0445	0.0952	0.0602	0.0544	0.0546

Como se pode observar, em todas as malhas os valores estabilizam na ordem da décima de milímetro para o valor de Profundidade Mínima Molhada=10⁻⁶m e, por isso, adotou-se esse valor para toda a análise de sensibilidade.

De seguida, fez-se uma análise de sensibilidade ao parâmetro Profundidade Mínima de Atrito (Quadro 4.6).

Quadro 4.6 – Onda tipo A - Análise de sensibilidade à Profundidade Mínima de Atrito (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Atrito de Fundo= 10^{-6}).

Profundidade Mínima de Atrito (m)	Espraiamento (m)				
	Malha 0.020m	Malha 0.016m	Malha 0.012m	Malha 0.008m	Malha 0.004m
0.1	0.0445	0.0952	0.0602	0.0544	0.0546
0.2	0.0445	0.0952	0.0602	0.0544	0.0546
0.5	0.0445	0.0952	0.0602	0.0544	0.0546
1	0.0445	0.0952	0.0602	0.0544	0.0546

Como se pode observar, em todas as malhas obteve-se o mesmo valor de espraiamento, não se chegando a nenhuma conclusão sobre a influência deste parâmetro para os valores adotados. Assim, optou-se por fixar a Profundidade Mínima de Atrito em 0.5m para efeito de analisar a sensibilidade dos resultados ao parâmetro Atrito de Fundo (Quadro 4.7).

Quadro 4.7 – Onda tipo A - Análise de sensibilidade ao Atrito de Fundo (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Profundidade Mínima de Atrito=0.5m).

Atrito de Fundo	Espraiamento (m)				
	Malha 0.020m	Malha 0.016m	Malha 0.012m	Malha 0.008m	Malha 0.004m
10^{-6}	0.0445	0.0952	0.0602	0.0544	0.0546
0.01	0.0438	0.0952	0.0602	0.0544	0.0546
0.02	0.0438	0.0952	0.0602	0.0544	0.0546
0.03	0.0438	0.0952	0.0602	0.0544	0.0546
0.1	0.0438	0.0952	0.0602	0.0544	0.0546
0.3	0.0438	0.0952	0.0602	0.0544	0.0546

Como se pode observar, em quase todas as malhas os valores de espraiamento não se alteraram com a variação considerada para o Atrito de Fundo.

Com base nos Quadros 4.6 e 4.7, chegou-se à conclusão que a causa da invariância dos valores de espraiamento se devia ao facto de se ter utilizado no modelo AMAZON valores de Profundidade Mínima de Atrito muito elevados, apropriados para casos à escala real, enquanto o caso de estudo foi efetuado à escala do modelo físico.

Consequentemente, decidiu-se utilizar um valor de Profundidade Mínima de Atrito muito mais baixo e, ao mesmo tempo, aumentou-se o número de sondas de 156 para 550, com um afastamento de 7mm entre si em grande parte do perfil, de modo a obterem-se mais dados pelo modelo AMAZON, permitindo calcular-se valores de espraiamento mais precisos. No Quadro 4.8 apresentam-se os valores de espraiamento obtidos para uma Profundidade Mínima de Atrito inicial de 0.015m.

Quadro 4.8 – Onda tipo A - Análise de sensibilidade ao Atrito de Fundo (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Profundidade Mínima de Atrito=0.015m).

Atrito de Fundo	Espraiamento (m)				
	Malha 0.020m	Malha 0.016m	Malha 0.012m	Malha 0.008m	Malha 0.004m
10^{-6}	0.0508	0.0525	0.0520	0.0557	0.0555
0.01	0.0508	0.0525	0.0520	0.0546	0.0553
0.03	0.0492	0.0525	0.0520	0.0530	0.0550
0.3	0.0400	0.0390	0.0397	0.0412	0.0412

Observa-se que, utilizando uma Profundidade Mínima de Atrito mais baixa, os valores de espraiamento obtidos com as diferentes malhas já são mais próximos entre si e conclui-se que, tal como seria de esperar, com o aumento do parâmetro de Atrito de Fundo os valores do espraiamento diminuem.

Assim, para se determinarem os melhores valores dos parâmetros que conduzem a valores de espraiamento próximos dos ensaios em modelo físico, adotaram-se valores de Atrito de Fundo da ordem dos obtidos nos ensaios (Atrito de Fundo=0.01 a 0.03). Numa primeira análise utilizou-se um Atrito de Fundo de 0.03 e fez-se variar a Profundidade Mínima de Atrito (Quadro 4.9).

Quadro 4.9 – Onda tipo A - Análise de sensibilidade à Profundidade Mínima de Atrito (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Atrito de Fundo=0.03).

Profundidade Mínima de Atrito (m)	Espraiamento (m)				
	Malha 0.020m	Malha 0.016m	Malha 0.012m	Malha 0.008m	Malha 0.004m
0.002	0.0391	0.0390	0.0395	0.0412	0.0403
0.003	0.0447	0.0390	0.0395	0.0412	0.0452
0.004	0.0391	0.0390	0.0454	0.0486	0.0484
0.005	0.0456	0.0491	0.0492	0.0520	0.0530
0.015	0.0492	0.0525	0.0520	0.0530	0.0550
0.15	0.0492	0.0525	0.0525	0.0520	0.0561
0.5	0.0509	0.0525	0.0520	0.0557	0.0560

Observou-se que os valores de espraiamento mais próximos dos ensaios físicos correspondem a valores de Profundidade Mínima de Atrito entre 0.002m e 0.004m, para Atrito de Fundo=0.03, valor dentro da gama dos ensaios em modelo físico. Por isso, efetuou-se uma análise semelhante para esses valores de Profundidade Mínima de Atrito, para Atrito de Fundo=0.01 (Quadro 4.10).

Com base nos Quadros 4.9 e 4.10, observou-se que os valores de espraiamento mais próximos dos ensaios físicos se obtinham para o Atrito de Fundo de 0.03 e Profundidade Mínima de Atrito de 0.003m, e para Atrito de Fundo de 0.01 e Profundidade Mínima de Atrito de 0.002m e de 0.003m.

Decidiu-se, então, correr o modelo AMAZON para os tipos de onda B (Quadros 4.11 e 4.12) e C (Quadros 4.13 e 4.14), utilizando os parâmetros mencionados anteriormente e as condições de agitação de cada respectivo tipo de onda.

Quadro 4.10 – Onda tipo A - Análise de sensibilidade da Profundidade Mínima de Atrito (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Atrito de Fundo=0.01).

Profundidade Mínima de Atrito (m)	Espraiamento (m)				
	Malha 0.020m	Malha 0.016m	Malha 0.012m	Malha 0.008m	Malha 0.004m
0.002	0.0391	0.0423	0.0431	0.0447	0.0456
0.003	0.0447	0.0447	0.0464	0.0486	0.0510
0.004	0.0460	0.0491	0.0510	0.0520	0.0532

Quadro 4.11 – Onda tipo B - Análise de sensibilidade à Profundidade Mínima de Atrito (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Atrito de Fundo=0.01).

Profundidade Mínima de Atrito (m)	Espraiamento (m)				
	Malha 0.020m	Malha 0.016m	Malha 0.012m	Malha 0.008m	Malha 0.004m
0.002	0.0628	0.0638	0.0643	0.0628	0.0667
0.003	0.0652	0.0672	0.0687	0.0652	0.0722

Quadro 4.12 – Onda tipo B - Análise de sensibilidade à Profundidade Mínima de Atrito (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Atrito de Fundo=0.03).

Profundidade Mínima de Atrito (m)	Espraiamento (m)				
	Malha 0.020m	Malha 0.016m	Malha 0.012m	Malha 0.008m	Malha 0.004m
0.003	0.0608	0.0603	0.0618	0.0603	0.0644

Quadro 4.13 – Onda tipo C - Análise de sensibilidade à Profundidade Mínima de Atrito (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Atrito de Fundo=0.01).

Profundidade Mínima de Atrito (m)	Espraiamento (m)				
	Malha 0.020m	Malha 0.016m	Malha 0.012m	Malha 0.008m	Malha 0.004m
0.002	0.0936	0.0936	0.0945	0.0962	0.0974
0.003	0.0970	0.0993	0.0995	0.1025	0.1041

Quadro 4.14 – Onda tipo C - Análise de sensibilidade à Profundidade Mínima de Atrito (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Atrito de Fundo=0.03).

Profundidade Mínima de Atrito (m)	Espraiamento (m)				
	Malha 0.020m	Malha 0.016m	Malha 0.012m	Malha 0.008m	Malha 0.004m
0.003	0.0911	0.0915	0.0924	0.0928	0.0941

Com base nos Quadros 4.9 a 4.14, tendo em conta os resultados obtidos com a malha de 0.004m, que é a malha mais refinada, conclui-se que os valores médios de espraiamento

obtidos nos ensaios físicos se situam sempre entre os valores de Atrito de Fundo=0.01 e 0.03, para a Profundidade Mínima de Atrito=0.003m, como se pode observar na Figura 4.11.

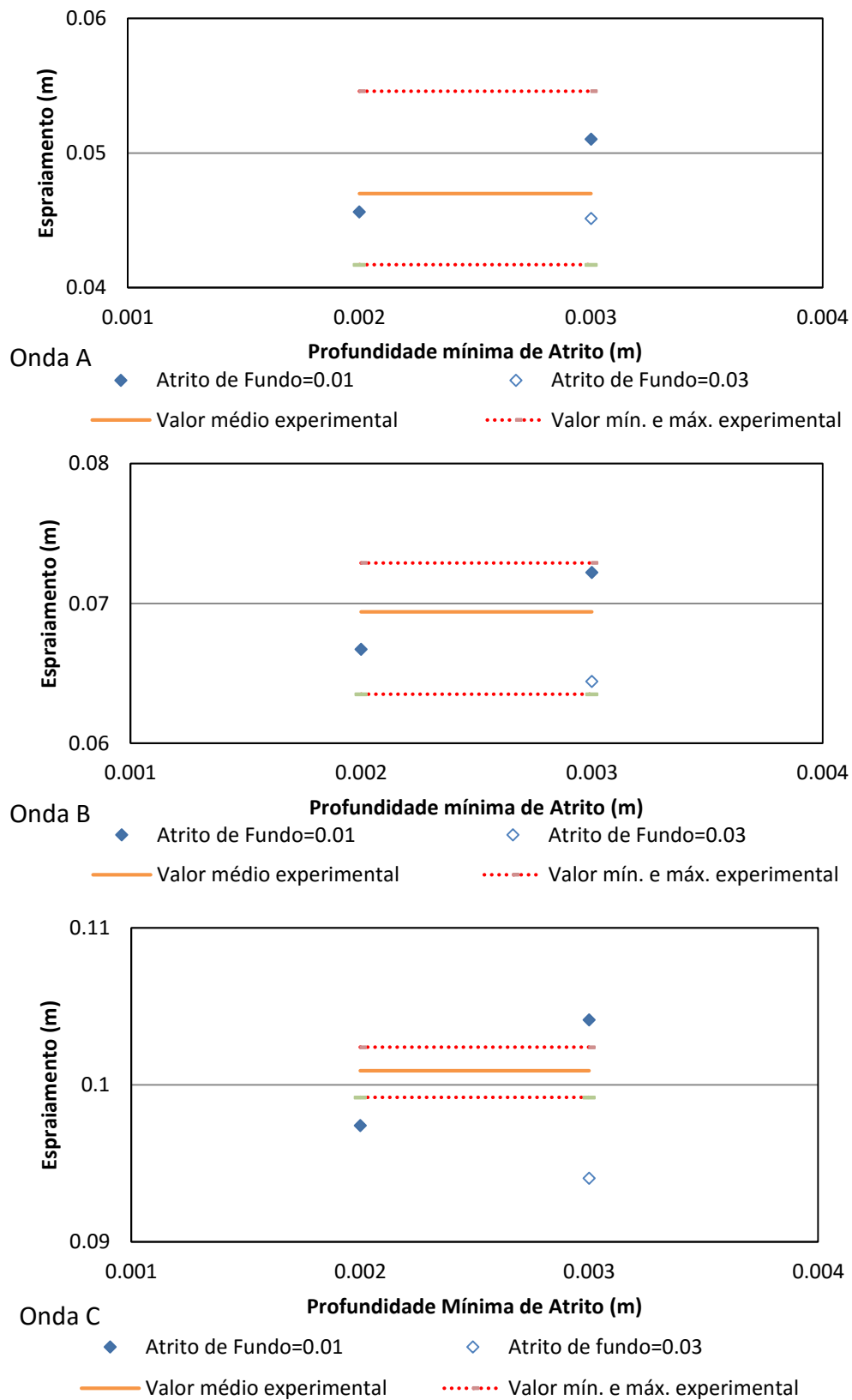


Figura 4.11 – Comparação do espraimento médio de ensaios físicos com os resultados de espraimento para as ondas tipo A, B e C.

Assim, decidiu-se utilizar para todos os tipos de ondas (A, B e C) um valor médio de Atrito de Fundo em relação aos utilizados anteriormente, ou seja, Atrito de Fundo=0.02 (Quadro 4.15).

Quadro 4.15 – Parâmetros ótimos de calibração para o caso de estudo (Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Profundidade Mínima de Atrito=0.003m, Atrito de Fundo =0.02).

Tipo de onda	Espraiamento (m)					Valores méd. ensaios
	Malha 0.020m	Malha 0.016m	Malha 0.012m	Malha 0.008m	Malha 0.004m	
A	0.0427	0.0431	0.0450	0.0452	0.0471	0.0475
B	0.0623	0.0638	0.0643	0.0672	0.0687	0.0697
C	0.0924	0.0932	0.0945	0.0962	0.0991	0.1014

Como podemos observar, a malha computacional de dimensão 0.004m, para os tipos de onda A, B e C, dá resultados de espraiamento muito semelhantes aos valores médios dos ensaios do modelo físico, com erros relativos de -0.8%, -1.5% e -2.3%, respetivamente, que, tal como esperado, são muito inferiores aos erros associados à aplicação dos fórmulas empíricas. Podemos então concluir que para o caso da praia com perfil barra-fossa em estudo, à escala laboratorial 1:5, os parâmetros ótimos de calibração do modelo numérico AMAZON são: Profundidade Mínima Molhada= 10^{-6} m, Profundidade Mínima de Atrito=0.003m e Atrito de Fundo=0.02.

Embora o modelo numérico AMAZON não tenha sido utilizado, até à presente data, para casos de estudo de praias com perfil barra-fossa, verificou-se nesta dissertação que, após uma correta calibração do modelo, os resultados de espraiamento são bastante precisos e satisfatórios.

Tendo em conta os parâmetros ótimos do AMAZON resultantes da calibração efetuada anteriormente para o espraiamento, determinaram-se para o caso de estudo os coeficientes de reflexão baseados nos resultados dos modelos físico e numérico (Quadro 4.16), utilizando para tal três sondas numéricas junto ao batedor e aplicando o método de Mansard e Funke (1980).

Quadro 4.16 – Coeficientes de reflexão dos modelos físico e numérico.

Tipo de onda	H_i (m)	H_r ensaios (m)	H_r AMAZON (m)	K_r ensaios	K_r AMAZON
A	0.208	0.011	0.057	0.053	0.274
B	0.208	0.019	0.024	0.091	0.115
C	0.391	0.035	0.077	0.090	0.197

Observa-se que os valores de altura de onda refletida obtidos pelo modelo AMAZON para os 3 tipos de ondas são superiores aos dos ensaios em modelo físico e,

consequentemente, os valores dos coeficientes de reflexão também o são, o que se poderá dever às simplificações inerentes ao AMAZON, que foi desenvolvido para águas pouco profundas e considerando a rebentação através do conceito de macaréu.

4.3.2 Comparação de resultados de diferentes malhas computacionais

Tendo em conta os resultados de espraçamento mostrados no Quadro 4.15, verifica-se que se obtêm valores de espraçamento mais precisos à medida que se diminui a dimensão da malha computacional. De modo a se poder avaliar a diferença de resultados entre malhas, efetuou-se uma análise estatística das diferenças das alturas de onda e períodos obtidas com as diferentes malhas, tendo como referência a malha computacional de 0.004m de dimensão, calculando-se a raiz do erro quadrático médio, $rmse$, dada por:

$$rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (4.1)$$

sendo x_i os valores de referência (da malha de 0.004m) e y_i os valores das diferentes malhas. Calculou-se $rmse$ para a altura média de onda, $H_{méd}$, e para o período médio de onda, $T_{méd}$ (Quadro 4.17).

Quadro 4.17 – $rmse$ para $H_{méd}$ e $T_{méd}$.

Tipo de onda	Malha 0.020m		Malha 0.016m		Malha 0.012m		Malha 0.008m	
	$rmse$ ($H_{méd}$)	$rmse$ ($T_{méd}$)	$rmse$ ($H_{méd}$)	$rmse$ ($T_{méd}$)	$rmse$ ($H_{méd}$)	$rmse$ ($T_{méd}$)	$rmse$ ($H_{méd}$)	$rmse$ ($T_{méd}$)
A	0.00148	0.09524	0.00113	0.09523	0.00075	0.07845	0.00041	0.06760
B	0.00109	0.00134	0.00083	0.00119	0.00054	0.00118	0.00029	0.00065
C	0.00127	0.12708	0.00098	0.12846	0.00064	0.06723	0.00036	0.07024

À medida que se diminui a dimensão da malha computacional, verifica-se uma diminuição constante do $rmse$ para $H_{méd}$ para os três tipos de onda (Figura 4.12). No entanto, para $T_{méd}$ (Figura 4.13), para a onda A, verifica-se uma diminuição do erro com a diminuição das malhas; para a onda B, o erro é praticamente constante para as diferentes malhas; e para a onda C, verifica-se, com a diminuição das malhas, uma diminuição do erro por patamares, existindo um aumento ligeiro do erro em cada patamar.

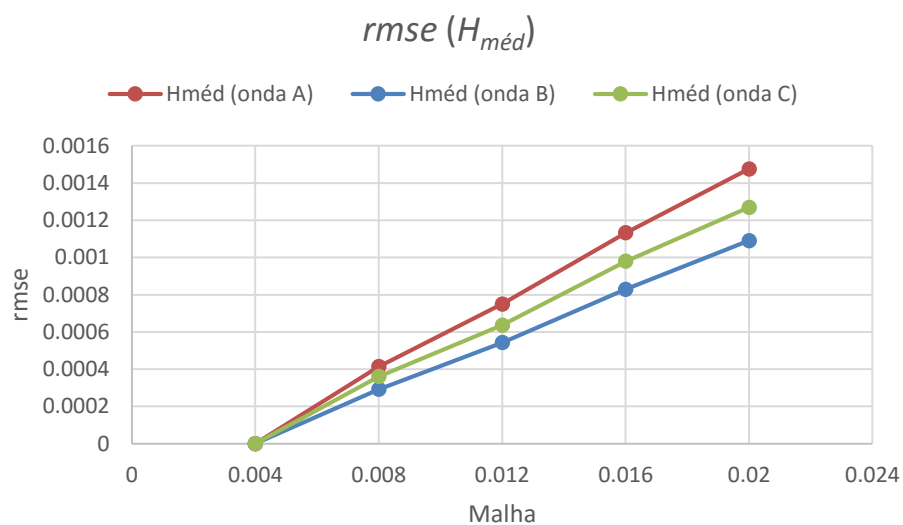


Figura 4.12 – Comparação de rmse ($H_{méd}$) para as diferentes malhas computacionais.

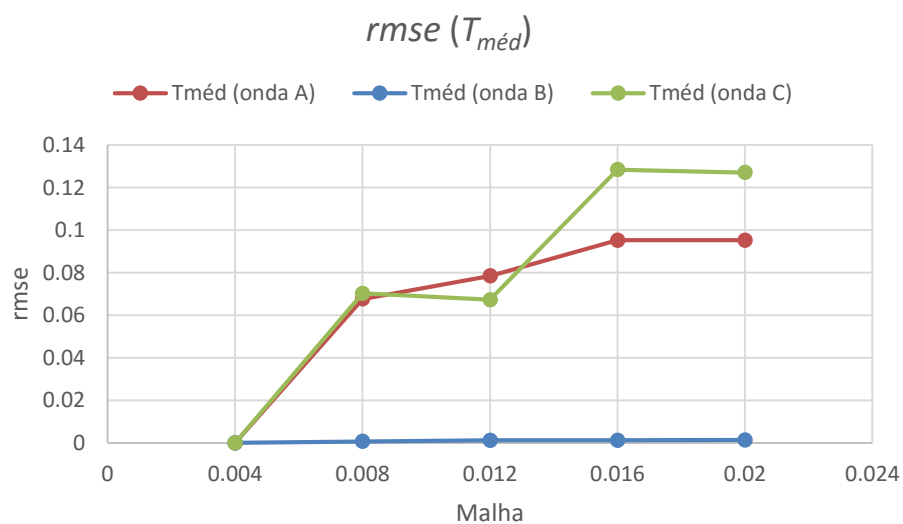


Figura 4.13 – Comparação de rmse ($T_{méd}$) para as diferentes malhas computacionais.

O tempo computacional da execução do programa com cada malha para os tipos de onda A, B e C pode ser observado no Quadro 4.18.

Quadro 4.18 – Tempo computacional das malhas para os tipos de onda A, B e C.

Tipo de onda	Tempo computacional (min)				
	Malha 0.020m	Malha 0.016m	Malha 0.012m	Malha 0.008m	Malha 0.004m
A	55	51	87	226	543
B	71	81	115	276	782
C	74	84	120	284	833

Verifica-se que as malhas computacionais mais grosseiras originam um tempo de corrida do modelo AMAZON relativamente baixo, mas quando comparados os valores do espraçamento para as diferentes malhas (Quadro 4.15), estas são também menos precisas. Regista-se um aumento considerável de tempo computacional da malha de referência em relação às outras malhas, embora seja esta malha a que faculte melhores valores de espraçamento. A diminuição para uma malha de dimensão inferior a 0.004m iria aumentar significativamente o tempo computacional e não apresentaria grande diferença nos resultados obtidos. Todos os programas utilizados foram corridos num computador com sistema operativo Windows.

5. Caso de estudo 2 – Estrutura conversora de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante

5.1 Enquadramento

Como referido no capítulo 2, nos últimos anos o modelo numérico AMAZON tem sido alvo de validação através da sua aplicação a vários casos de estudo. Na presente dissertação, o segundo caso de validação do modelo AMAZON consiste no estudo de uma estrutura conversora de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante, OWC-WEC (*Oscillating Water Column - Wave Energy Converter*), estruturas para as quais o modelo AMAZON não foi, até à data, aplicado. Esta aplicação foi aceite como comunicação (Anexo C) a apresentar no congresso internacional *SCACR2015 - 7th International Short Course and Conference on Applied Coastal Research*.

De modo a estudar o OWC-WEC integrado em quebra-mares verticais ou no litoral, foi iniciado em julho de 2014 o projeto de investigação chamado DITOWEC – “Development of an Integrated Tool for Numerical Modelling of Oscillating Water Column Wave Energy Converters Integrated in Vertical Breakwaters”, com o objetivo de desenvolver uma ferramenta pelo acoplamento de diferentes modelos numéricos de propagação de ondas, interação onda-estrutura, hidrodinâmica e aerodinâmica do dispositivo OWC-WEC. Esta ferramenta será validada com dados experimentais de ensaios em modelo físico realizados no LNEC, antes de ser aplicada ao OWC-WEC do Pico, Açores, Portugal (Simões, 2006). Esta estrutura tem sido monitorizada desde 2005 pelo Centro de Energia das Ondas (Brito Melo *et al.*, 2007), o que permite ter dados para efetuar uma comparação de resultados numéricos e dados em protótipo para várias condições de onda incidente.

5.2 Descrição do caso de estudo

De modo a verificar a aplicabilidade do modelo AMAZON a este tipo de estruturas verticais, aplicou-se o modelo para as condições de batimetria, nível da água e condições de agitação que correspondem às dos ensaios em modelo físico realizados no LNEC à escala 1:35. Os ensaios foram realizados num canal com aproximadamente 50m de comprimento e 0.80m de largura e de profundidade úteis. Neste canal foi utilizado um gerador de ondas tipo-pistão e sondas do tipo resistivo utilizadas para determinar as características das ondas em frente ao gerador, e em frente e no interior da estrutura vertical ensaiada.

Até à presente data, a modelação física centrou-se na reprodução de uma câmara esquemática totalmente aberta. Foram ensaiadas condições de agitação para uma altura de onda regular, H , de 0.038m e um período de onda, T , variando de 0.67 a 2.30s (Figura 5.1). A profundidade da água no canal era de 0.46m no local do gerador de ondas e 0.15m no local de entrada da câmara. A câmara tem uma largura de 0.20m e uma abertura de 0.075m de altura, que corresponde a metade da profundidade da água no local de entrada da câmara.

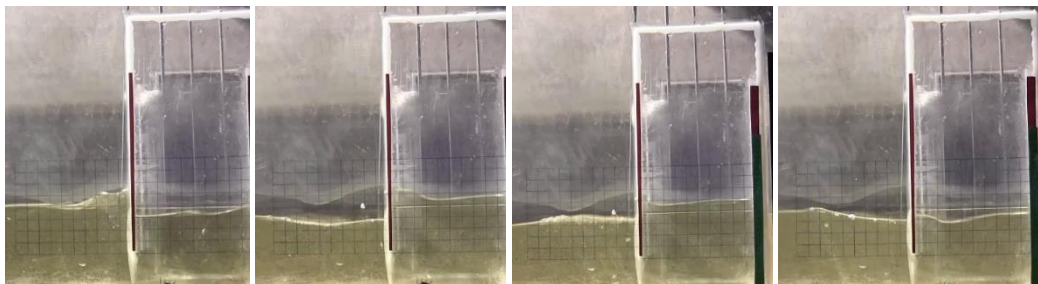


Figura 5.1 – Modelo físico na zona da câmara para quatro instantes durante um ensaio para $T=1.0s$ e $H=0.038m$.

A Figura 5.2 representa um esquema do canal, da câmara e das posições das sondas (Sb1, Sb2, G1 a G8). As sondas foram utilizadas para registar a elevação da superfície livre, η , que foi medida em dez secções do canal: perto do gerador de ondas, na base da rampa, na rampa, antes da câmara e dentro da câmara. Cada tipo de onda foi ensaiada oito vezes para assegurar a precisão dos resultados experimentais.

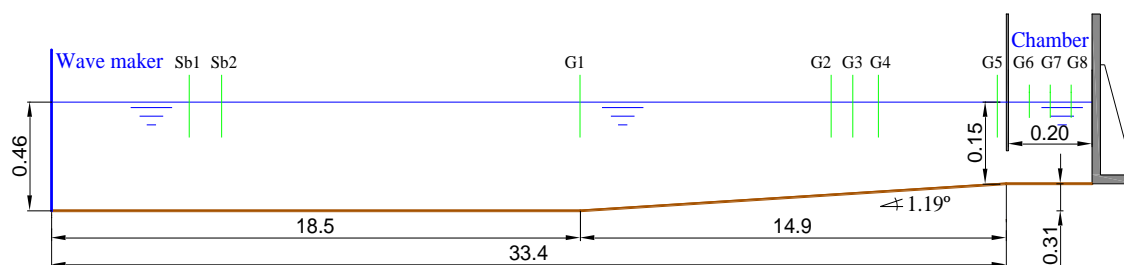


Figura 5.2 – Esquema do canal, da câmara e posições das sondas (dimensões em metros).

As séries temporais da elevação da superfície livre registadas na sonda G4 foram utilizadas como condição de fronteira de entrada no modelo AMAZON, dado que o modelo AMAZON requer que este limite se localize aproximadamente a um comprimento de onda do pé da estrutura (Reis *et al.*, 2009a,b). As séries temporais da elevação da superfície livre registadas nas sondas G5 a G8 foram utilizadas para calibrar e validar os resultados do AMAZON, tendo sido analisados três períodos de onda: $T=0.89s$, $T=1.15s$ e $T=1.60s$.

5.3 Aplicação do modelo AMAZON

5.3.1 Análise de sensibilidade à dimensão das malhas e ao parâmetro n

De modo a se obterem valores de elevação da superfície livre o mais próximos possível dos valores provenientes dos ensaios em modelo físico com ondas regulares, o modelo numérico AMAZON foi convenientemente calibrado.

Para o presente caso de estudo, inseriu-se no AMAZON as características do perfil dos ensaios (Figura 5.2), as condições de agitação (altura de onda e diferentes períodos) e o nível da água (0.46m junto ao gerador).

Outros valores de entrada também necessários no modelo AMAZON são a dimensão da malha computacional, o número de ondas simulado e o número de ondas para aquecimento (*warming up time*). Para definir a dimensão ótima da malha computacional, analisaram-se, para todos os casos, 5 malhas de dimensão constante em todo o domínio: malha de 0.02m, de 0.004m, de 0.003m, de 0.002m e de 0.001m, ou seja, começou por se analisar uma malha mais grosseira (de 0.02m) e foi-se diminuindo a sua dimensão, até uma malha mais fina (de 0.001m). Como número de ondas a simular, optou-se por 50 ondas. Para o número de ondas de aquecimento adotaram-se 5 ondas.

Apesar de o modelo numérico AMAZON permitir inserir um vasto número de sondas (mais de 1000 sondas), utilizaram-se as mesmas sondas e com igual localização no perfil, que foram utilizadas nos ensaios experimentais (Figura 5.3 e Quadro 5.1).

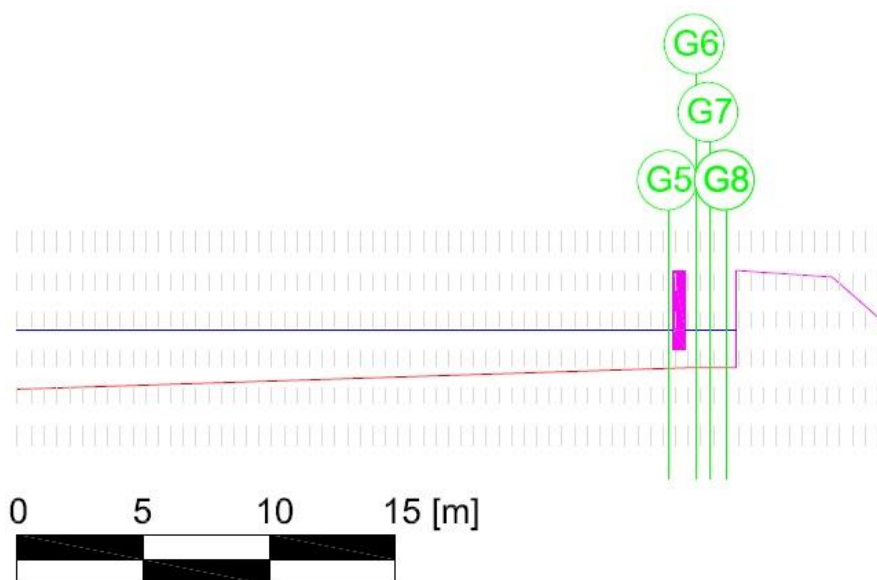


Figura 5.3 – Representação esquemática da discretização da malha computacional (a cinzento), da rampa (a vermelho), da câmara e barreira vertical (a roxo), do nível de água em repouso (a azul) e da localização das secções de medição (a verde), em protótipo.

Quadro 5.1 – Coordenadas das sondas inseridas no modelo AMAZON.

Sonda nº	Coordenada x AMAZON (m)
1 (G5)	2.615
2 (G6)	2.690
3 (G7)	2.745
4 (G8)	2.810

Para a análise de sensibilidade dos resultados do AMAZON à dimensão da malha, utilizou-se $n=1$ (valor pré-definido do fator de calibração) e a onda com período $T=1.15s$.

A Figura 5.4 mostra as séries temporais da elevação da superfície livre registadas nas sondas G5 (antes da câmara) e G7 (sonda no meio da câmara) obtidas com o modelo AMAZON, com as malhas computacionais de 0.02m, 0.004m e 0.001m. Como se pode observar na figura, não existe grande diferença para as malhas computacionais de 0.004m e 0.001m, sendo a malha de 0.02m demasiado grosseira, conduzindo a valores de elevação de superfície livre mais reduzidos.

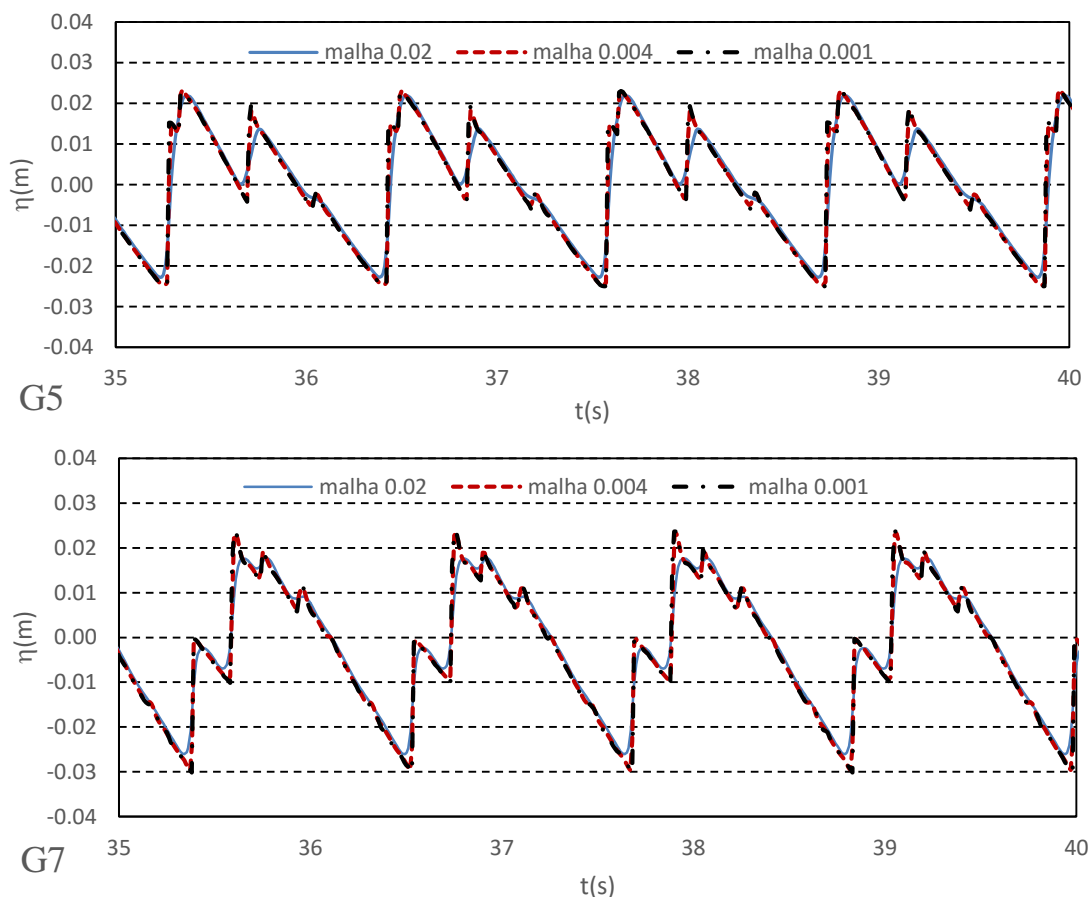


Figura 5.4 – Séries temporais da elevação da superfície livre obtidas com o modelo AMAZON para as sondas G5 e G7, com as malhas de 0.02m, 0.004m e 0.001m ($n=1$, $T=1.15s$ e $H=0.038m$).

De modo a decidir qual a malha computacional mais adequada a usar nas próximas análises, tendo em conta a sua precisão e o tempo de cálculo, o Quadro 5.2 mostra o tempo computacional para as diversas malhas ($T=1.15s$).

Quadro 5.2 – Tamanho da malha e tempo computacional das diversas malhas consideradas ($T=1.15s$).

Malha computacional (m)	Tempo computacional (min)
0.02	0.5
0.004	8
0.003	20
0.002	44
0.001	98

Como se pode observar, a malha de 0.02m é a menos precisa, mas apresenta um tempo de corrida muito baixo. A malha de 0.004m parece ser a melhor escolha, tendo em conta o tempo de corrida do modelo AMAZON e a precisão de resultados quando comparada com a malha de 0.001m.

Após a escolha da melhor malha computacional para o caso em estudo, segue-se a calibração do modelo AMAZON para o parâmetro n . Foram estudados diferentes valores de n , desde 0.2 a 4, para $T=1.15s$. A Figura 5.5 mostra a comparação das séries temporais da elevação da superfície livre nas sondas G5 e G7 para diferentes valores de n . Como se pode observar, a diminuição do valor do parâmetro n leva a uma diminuição da altura de onda fora da câmara e dentro da câmara regista-se o oposto, aumentando a altura de onda. Para valores de n maiores ($n \geq 2$), parece não passar nenhuma energia por debaixo da barreira vertical para a câmara. Para $0.02 \leq n < 0.2$, não se registaram alterações significativas, pelo que os resultados não se apresentam na presente dissertação.

5.3.2 Calibração do modelo AMAZON e comparação com o modelo físico

A calibração do modelo numérico AMAZON foi feita tendo como base a comparação entre os resultados dos ensaios em modelo físico realizados no LNEC e os resultados do modelo AMAZON para a malha computacional de 0.004m, $T=1.15s$ e n a variar entre 0.2 e 4. A Figura 5.6 mostra as séries temporais da elevação da superfície livre fora da câmara (G5) e a Figura 5.7 as médias da elevação da superfície livre dentro da câmara (média das sondas G6, G7 e G8), para ambos os modelos físico e numérico.

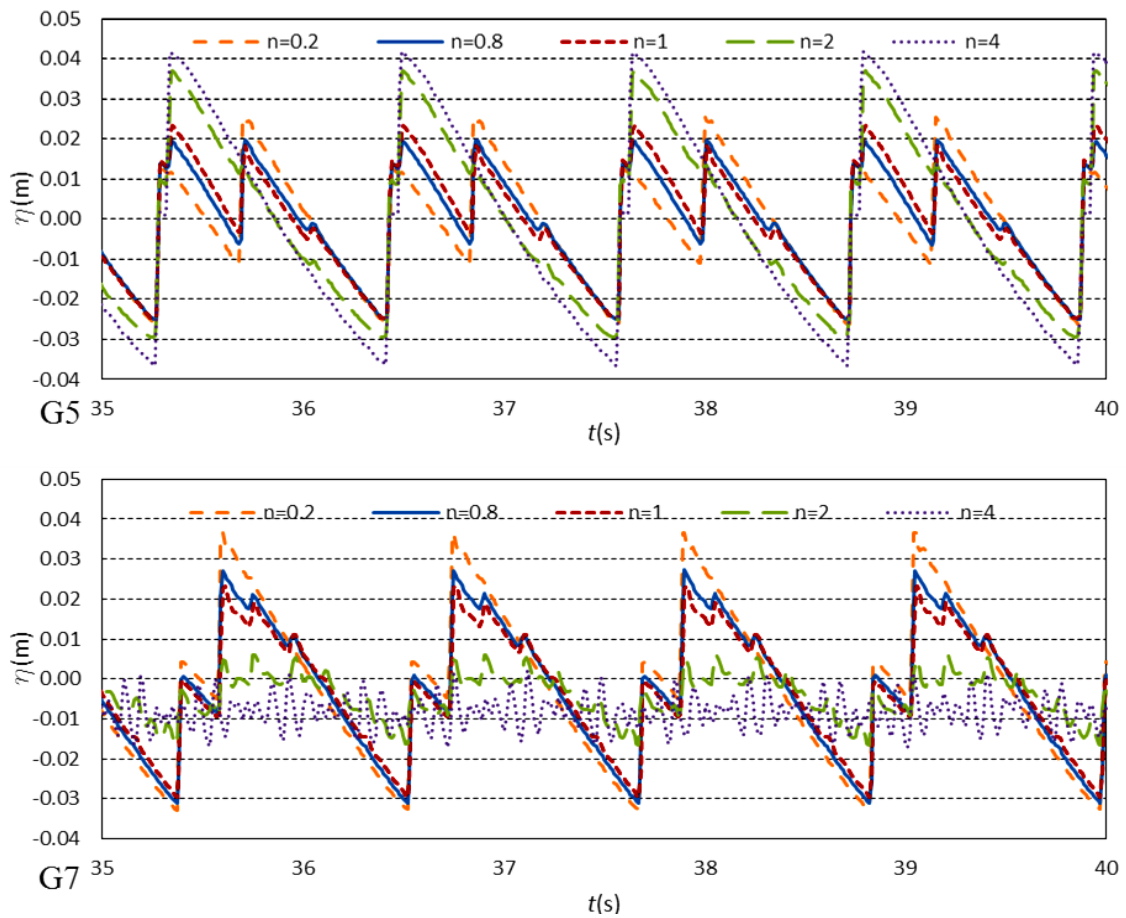


Figura 5.5 – Séries temporais da elevação da superfície livre do modelo AMAZON para as sondas G5 e G7 com a malha de 0.004m, para diferentes valores de n ($T=1.15s$ e $H=0.038m$).

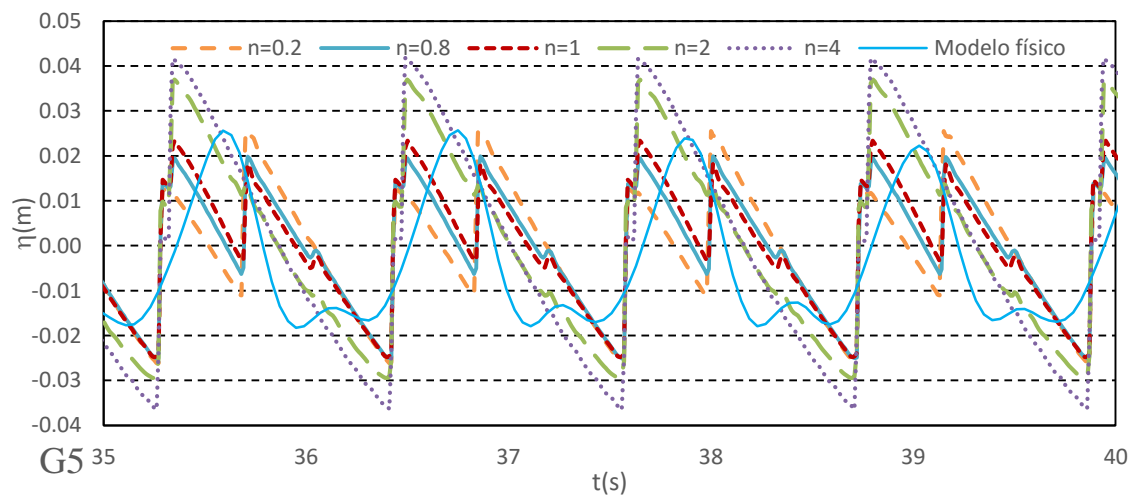


Figura 5.6 – Séries temporais da elevação da superfície livre fora da câmara (sonda G5), obtidas com o modelo físico e com o modelo AMAZON para a malha de 0.004m, para diferentes valores de n ($T=1.15s$ e $H=0.038m$).

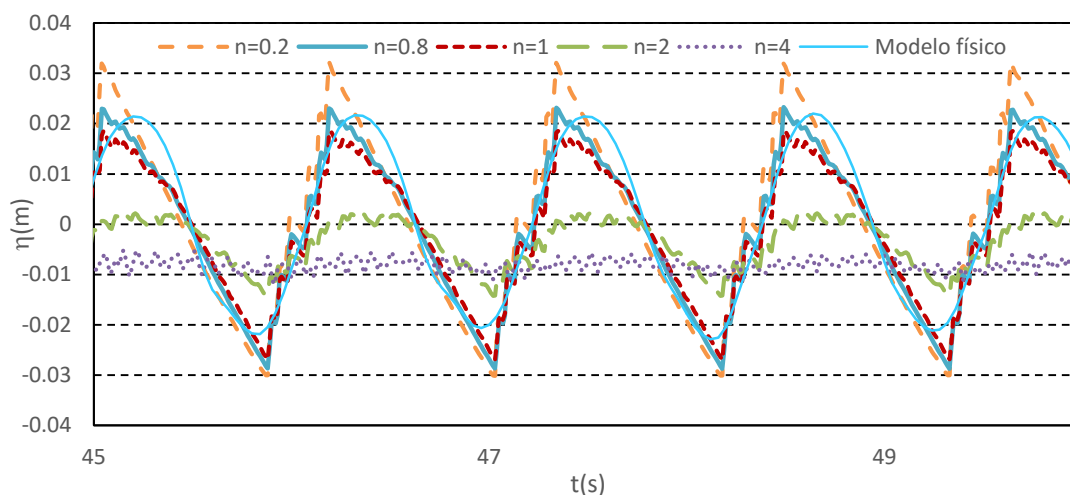


Figura 5.7 – Médias da elevação da superfície livre dentro da câmara, obtidas com o modelo físico e com o modelo AMAZON para a malha de 0.004m, para diferentes valores de n ($T=1.15s$ e $H=0.038m$).

Como se pode observar, os resultados sugerem que o valor de n com o qual se obtém uma maior semelhança entre os resultados dos modelos AMAZON e físico é $n=1$, apesar das diferenças na forma das ondas, que possivelmente se deve à forma como o modelo AMAZON simula a rebentação de ondas (aproximadas por frentes verticais, ignorando assim a estrutura detalhada da rebentação das ondas). Consequentemente, para $n=1$ calculou-se o fator de amplificação, definido como a razão entre a média das alturas de onda dentro da câmara e a altura de onda incidente, e o desfasamento, diferença angular entre as séries temporais da elevação da superfície livre dentro e fora da câmara. No Quadro 5.3 estão representados o fator de amplificação e o desfasamento para os resultados experimentais e numéricos para $T=1.15s$.

Quadro 5.3 – Fator de amplificação e desfasamento para os resultados experimentais e numéricos ($n=1$, $T=1.15s$).

Resultados	Fator de amplificação	Desfasamento ($^{\circ}$)
Experimental	1.13	80.6
Numérico	0.94	93.9

Apesar da forma das ondas não ser corretamente modelada pelo modelo AMAZON, os valores do fator de amplificação e do desfasamento obtido não diferem muito dos valores experimentais.

Seguidamente, realizou-se o mesmo estudo para os outros dois períodos considerados ($T=0.89s$ e $T=1.60s$), usando a malha computacional de 0.004m e $n=1$ (Figuras 5.8 a 5.11 e Quadro 5.4).

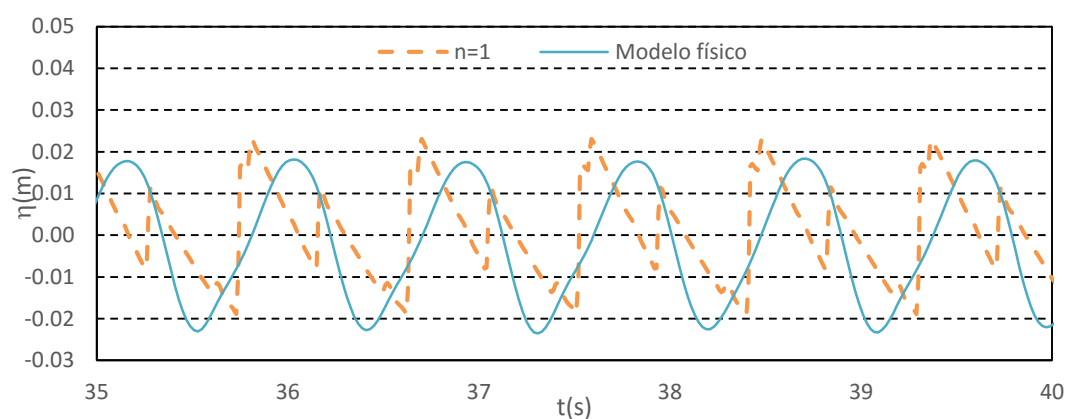


Figura 5.8 – Séries temporais da elevação da superfície livre fora da câmara (sonda G5), obtidas com o modelo físico e com o modelo AMAZON para a malha de 0.004m, para $n=1$ ($T=0.89s$ e $H=0.038m$).

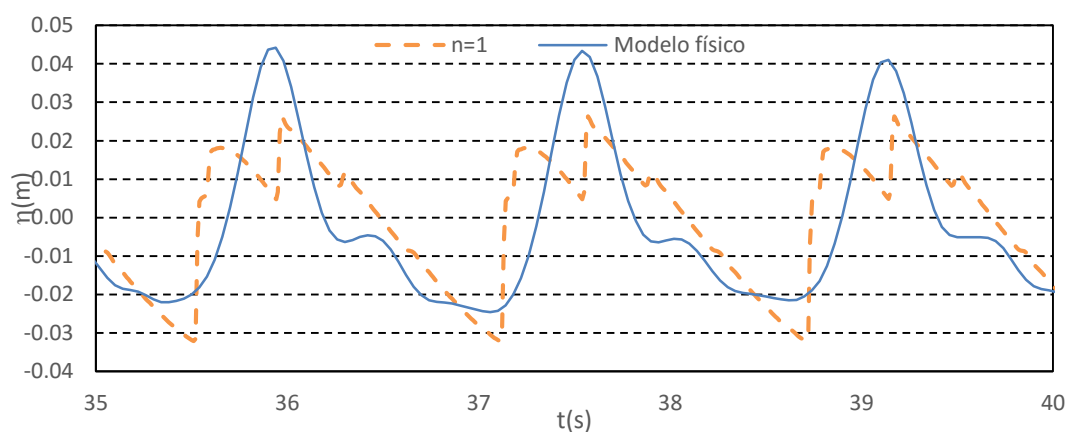


Figura 5.9 – Séries temporais da elevação da superfície livre fora da câmara (sonda G5), obtidas com o modelo físico e com o modelo AMAZON para a malha de 0.004m, para $n=1$ ($T=1.60s$ e $H=0.038m$).

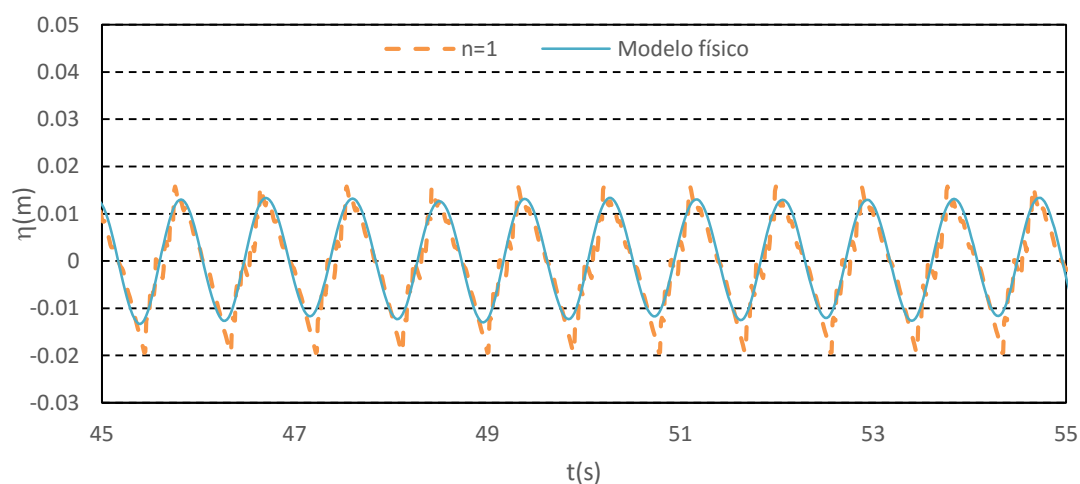


Figura 5.10 – Médias da elevação da superfície livre dentro da câmara, obtidas com o modelo físico e com o modelo AMAZON para a malha de 0.004m, para $n=1$ ($T=0.89s$ e $H=0.038m$).

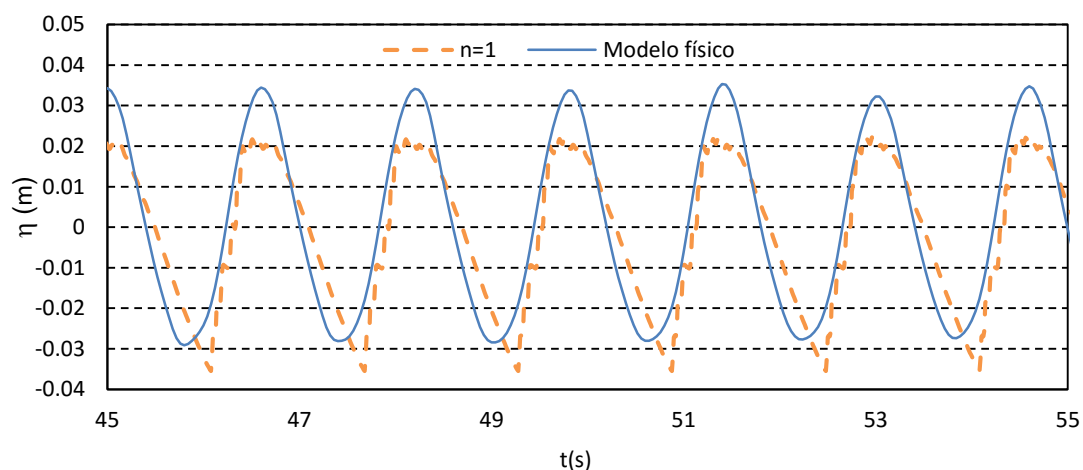


Figura 5.11 – Médias da elevação da superfície livre dentro da câmara, obtidas com o modelo físico e com o modelo AMAZON para a malha de 0.004m, para $n=1$ ($T=1.60s$ e $H=0.038m$).

Quadro 5.4 – Fator de amplificação e desfasamento para os resultados experimentais e numéricos ($n=1$, $T=0.89s$ e $T=1.60s$).

Período (s)	Fator de amplificação		Desfasamento (°)	
	Experimental	Numérico	Experimental	Numérico
0.89	0.67	0.85	132.1	117.3
1.6	1.66	1.06	37.8	20.3

Como se pode observar, os resultados mostram que para o período $T=0.89s$, o valor do fator de amplificação obtido com o modelo numérico é maior do que o valor obtido nos ensaios físicos, ocorrendo o oposto para o desfasamento. Para o período $T=1.60s$, os valores obtidos nos ensaios físicos são maiores do que os valores obtidos com o modelo numérico. Estes resultados sugerem que o valor do parâmetro n a utilizar deve ser função do período de onda e que quanto maior o período de onda, menor deve ser o parâmetro n . Isto está em conformidade com o facto de que quanto maior o período de onda, maior é a sua capacidade de penetrar na câmara. Consequentemente, para simular este comportamento, a restrição sobre a barreira vertical imposta no modelo AMAZON deve ser reduzida à medida que o período da onda aumenta.

6. Considerações finais e desenvolvimentos futuros

Dado que Portugal continental tem uma extensa zona costeira que está geralmente associada a atividades económicas, é importante desenvolver métodos e modelos de cálculo que permitam apoiar o dimensionamento de estruturas marítimas, costeiras e portuárias, que salvaguardem a segurança de pessoas e de bens materiais. As preocupações de projetistas na conceção de estruturas marítimas utilizando modelos numéricos como ferramentas de dimensionamento, prendem-se com a sua fiabilidade, tempo de processamento e precisão. Assim, a calibração e validação de modelos numéricos é essencial para os tornar ferramentas úteis para o projeto de obras marítimas.

O principal objetivo desta dissertação é a calibração e a validação do modelo numérico AMAZON quando aplicado a dois casos de estudo, em particular, o estudo do fenómeno do espraçamento e da reflexão numa praia barra-fossa e a amplificação da agitação numa estrutura conversora de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante, caso que nunca antes tinha sido estudado usando o modelo numérico AMAZON.

Para o primeiro caso de validação do modelo AMAZON, as condições de batimetria, nível da água e condições de agitação marítima inseridas no AMAZON correspondem às de ensaios em modelo físico realizados à escala 1:5, na Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, no canal de ondas CIEM (Canal de Investigação e Experimentação Marítima). Para o segundo caso de validação do modelo AMAZON, as condições de batimetria, nível da água e condições de agitação de ondas correspondem às de ensaios em modelo físico realizados à escala 1:35, no LNEC.

Relativamente ao caso de estudo da praia barra-fossa, estudaram-se três tipos de onda regular, tendo duas igual altura de onda e outras duas igual período de onda. Primeiro inseriu-se no modelo numérico AMAZON o perfil e as condições de agitação de uma das ondas, tipo A, e de seguida fez-se uma análise de sensibilidade aos parâmetros de calibração. O primeiro estudo de sensibilidade diz respeito à análise da influência da dimensão da malha nos resultados do modelo, tendo-se utilizado malhas computacionais de dimensão a variar de 0.02m a 0.004m. Analisou-se ainda a influência da variação de três parâmetros do modelo: Profundidade Mínima de Atrito, Atrito de Fundo e Profundidade Mínima Molhada. Inicialmente mantiveram-se os valores pré-definidos no modelo AMAZON dos parâmetros Profundidade Mínima de Atrito e Atrito de Fundo, e fez-se variar a Profundidade Mínima Molhada. Verificou-se uma estabilização nos valores de espraçamento para o valor de Profundidade Mínima Molhada de 10^{-6} m, pelo que se manteve este valor fixo para o resto da análise de sensibilidade. De seguida variou-se o parâmetro Profundidade Mínima de Atrito entre 0.1m e 1m, não se tendo registado quaisquer diferenças nos valores de espraçamento com a variação deste parâmetro. Mantendo-se fixa a Profundidade Mínima de Atrito em 0.5m, variou-se o Atrito

de Fundo entre 10^{-6} e 0.3. Registou-se também uma invariância dos valores de espraioamento devido à utilização de valores elevados de Profundidade Mínima de Atrito, que correspondem a valores à escala real. Tendo sido os casos feitos à escala laboratorial, decidiu-se utilizar um valor para a Profundidade Mínima de Atrito inferior, de 0.015m, e variar o Atrito de Fundo. Observou-se então uma variação dos valores do espraioamento, ainda que os valores obtidos fossem diferentes dos valores dos ensaios do modelo físico.

Assim, decidiu-se utilizar os valores de Atrito de Fundo adotados nos ensaios, com valores entre 0.01 e 0.03 e, utilizando os valores de Profundidade Mínima de Atrito de 0.002m e 0.003m, correu-se o modelo AMAZON para as três características de ondas simuladas, concluindo-se que os valores médios de espraioamento dos ensaios físicos se situavam sempre entre os valores de Atrito de Fundo de 0.01 e 0.03, para a Profundidade Mínima de Atrito de 0.003m.

Assim, utilizou-se um valor de Atrito de Fundo de 0.02 e chegou-se a resultados de espraioamento muito semelhantes aos resultados experimentais, concluindo-se que os parâmetros ótimos de calibração do modelo numérico AMAZON para o caso de estudo são: Profundidade Mínima Molhada de 10^{-6} m, Profundidade Mínima de Atrito de 0.003m e Atrito de Fundo de 0.02.

Relativamente à dimensão da malha computacional, recomenda-se a malha de 0.004m, apesar do tempo computacional ser significativo (9-14h), já que dá resultados mais precisos e a utilização de uma malha de dimensão inferior iria aumentar significativamente o tempo computacional e não apresentaria grande melhoria nos resultados obtidos.

Determinou-se de seguida o coeficiente de reflexão para os três tipos de onda e observou-se que são superiores aos dos ensaios em modelo físico, concluindo-se que o modelo AMAZON dá resultados bastante satisfatórios para o espraioamento, mas, para a reflexão, dá resultados mais elevados, o que se poderá dever às simplificações inerentes ao AMAZON, que foi desenvolvido para águas pouco profundas e considerando a rebentação através do conceito de macaréu.

Relativamente ao caso de estudo da estrutura conversora de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante, analisaram-se, para uma mesma altura de onda, três períodos de onda: $T=0.89$ s, $T=1.15$ s e $T=1.60$ s. Após inserir-se no modelo AMAZON o perfil, o nível da água e as condições de agitação, fez-se uma análise de sensibilidade ao parâmetro de calibração, n , e à dimensão das malhas computacionais.

Utilizando-se a onda com período $T=1.15$ s e $n=1$ (valor pré-definido do fator de calibração), fez-se variar a malha computacional de 0.02m a 0.001m, verificando-se que não existe grande diferença para as malhas computacionais de 0.004m e 0.001m em termos de valores de elevação da superfície livre, sendo a malha de 0.02m demasiado grosseira. Analisando os tempos computacionais, decidiu-se utilizar a malha de 0.004m que constitui o melhor compromisso entre precisão e tempo de execução.

De seguida, para a malha de 0.004m e $T=1.15$ s, fez-se uma análise de sensibilidade ao parâmetro de calibração n , variando-o entre 0.2 e 4. Analisando as séries temporais da

elevação da superfície livre, observa-se que a diminuição do valor do parâmetro n conduz a uma diminuição da altura de onda antes da câmara e o oposto acontece dentro da câmara.

Seguidamente, para calibrar o modelo AMAZON para o caso de estudo, compararam-se os resultados do modelo físico com os resultados do modelo AMAZON para diferentes valores de n , para uma sonda, G5, localizada antes da câmara e para a média da elevação da superfície livre no interior da câmara (malha de 0.004m e $T=1.15s$). Observou-se que o valor de $n=1$ é o que proporciona um melhor ajuste aos resultados experimentais e, conseqüentemente, calculou-se o fator de amplificação e o desfasamento. Verificou-se que, para o fator de amplificação, os resultados experimentais e numéricos não diferem muito, ao contrário do que acontece para o desfasamento, no qual as diferenças são consideráveis.

Realizou-se então o mesmo estudo para $T=0.89s$ e $T=1.60s$, usando a malha computacional de 0.004m e $n=1$. Observou-se que o fator de amplificação e o desfasamento no modelo numérico são maiores do que os valores obtidos pelos ensaios físicos para o período $T=0.89s$ e que para o período $T=1.60s$ regista-se o oposto. Assim, os resultados sugerem que o valor do parâmetro n a utilizar deve ser função do período de onda e que quanto maior o período de onda, menor deve ser o valor de n .

Em suma, os resultados do modelo AMAZON para o segundo caso de estudo da presente dissertação são animadores, mas são necessários mais estudos no futuro com diferentes profundidades de água, períodos de onda e aberturas da barreira vertical, permitindo assim a calibração e validação sistemática do modelo AMAZON.

O modelo numérico AMAZON tem vindo a ser desenvolvido ao longo dos anos e as suas melhorias são importantes para a sua aplicação como ferramenta de apoio ao projeto de obras marítimas, dada a sua eficiência computacional quando comparada com a de outros modelos numéricos mais complexos.

Referências bibliográficas

- Baquerizo, A. (1995) – Reflexión del oleaje en playas. Métodos de evaluación y de predicción. Tese de doutoramento. Universidade de Cantábria, 1-180.
- Brito Melo, A., Neumann, F., Didier, E.; Sarmiento, A. (2007) – Full-scale data assessment in OWC Pico Plant. *Proc. ISOPE*, Lisbon, 447-454.
- Clarke, S.; Dodd, N.; Damgaard, J. (2004) – Modelling flow in and above a porous beach. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 130(5):223-233.
- Dalrymple, R.A.; Rogers, B.D. (2006) - Numerical modeling of water waves with the SPH method. *Coastal Engineering*, 53(2-3):141-147.
- Didier, E.; Martins, R.; Neves, M.G. (2013) - Numerical and Experimental Modeling of Regular Wave Interacting with a Composite Breakwater. *IJOPE - International Journal of Offshore and Polar Engineering*, The International Society of Offshore and Polar Engineers (IJOPE), 23(1):46-54.
- Didier, E.; Neves, D.R.C.B.; Martins, R.; Neves, M.G. (2014) - Wave interaction with a vertical breakwater: SPH numerical and experimental modelling. *Ocean Engineering*, 88(2014):330-341.
- Didier, E.; Neves, M.G. (2009) – Wave overtopping of a typical coastal structure of the Portuguese coast using a SPH model. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 56:496-500.
- Dodd, N. (1998) - Numerical model of wave run-up, overtopping and regeneration. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 124(2):73-81.
- Harten, A., Lax, P.D. and Van Leer, B. (1983) – On upstream differencing and Godunov type schemes for hyperbolic conservation laws. *SIAM Review*, 25(1):35-61.
- Higuera, P.; Lara, J.L.; Losada, I.J. (2014a) - Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM. PartII. Applications. *Coastal Engineering*, 83:243–258.
- Higuera, P.; Lara, J.L.; Losada, I.J. (2014b). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM. PartI. Formulation and validation. *Coastal Engineering*, 83:259–270.
- Holman, R.A. (1986) – Extreme value statistics for wave-run-up on a natural beach. *Coastal Engineering*, 9:527-544.
- Hu, K. (2000) – High-Resolution Finite Volume Methods for Hydraulic Flow Modelling. PhD Thesis, Centre for Mathematical Modelling and Flow Analysis, Manchester Metropolitan University, Manchester, Reino Unido.
- Hu, K.; Meyer, D. (2005) – The validity of the non-linear shallow water equations for modelling wave runup and reflection. *Proc. ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '05*, 195-206, Thomas Telford, Londres, Reino Unido.
- Hu, K.; Mingham, C.G.; Causon, D.M. (2000) – Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the non-linear shallow water equations. *Coastal Engineering*, 41(4):433-465.

Hunt, A. (1959) – Design of seawalls and breakwaters. *Journal of Waterways and Harbours Division*, ASCE, (WW3):123-152

Lin, P.; Liu, P.L.-F. (1998) – A numerical study of breaking waves in the surf zone. *Journal of Fluid Mechanics*, 359:239-264.

Losada, I.J.; Lara, J.L.; Guanche, R.; Gonzalez-Ondina, J.M. (2008) – Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 55(1):47-62.

Mansard, E.P.D.; Funke, E.R. (1980) – The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Proc. 17th International Conference on Coastal Engineering*, 2:154-172, ASCE, Sidney.

Mariz, S.; Patrício, T.; Reis, M.T.; Neves, M.G.; Silva, A.P.; Didier, E.; Hu, K. (2012) - Cálculo do galgamento no quebra-mar poente do porto de pesca de albufeira: análise de sensibilidade dos parâmetros dos modelos AMAZON e IH-2VOF. *Proc. MEFTE 2012 - IV Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia* (CD-Rom), APMTAC, Lisboa, 28 e 29 de maio de 2012.

Matias, A.; Williams, J.; Masselink, G.; Ferreira, O. (2012) – Overwash threshold for gravel barriers. *Coastal Engineering*, 63:48-61.

Neves, M.G.; Reis, M.T.; Didier, E. (2010) – Comparisons of wave overtopping at coastal structures calculated with AMAZON, COBRAS-UC and SPHYSICS. *Proc. ECCOMAS CFD 2010, V European Conference on Computational Fluid Dynamics*, LNEC, Lisbon, Portugal.

Neves, M.G.; Reis, M.T.; Losada, I.; Hu, K. (2008) – Wave overtopping of Póvoa de Varzim breakwater: physical and numerical simulations. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 134(4):226-236.

Nielsen, P.; Hanslow, D. (1991) – Wave run-up distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*, 7(4):1139-1152.

Pullen, T.; Allsop, N.W.H. (2003). Use of Numerical Models of Wave Overtopping: A Summary of Current Understanding. (www.hrwallingford.co.uk).

Reis, M.T.; Hu, K.; Hedges, T.S.; Mase, H. (2008a) - A comparison of empirical, semiempirical, and numerical wave overtopping models. *Journal of Coastal Research*, 24(2B):250-262.

Reis, M.T.; Hu, K.; Neves, M.G.; Hedges, T.S. (2008b) – Numerical modelling of breakwater overtopping using a NLSW equation model with a porous layer. *Proc. 31st International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, 3097-3109, World Scientific, Singapore.

Reis, M.T.; Neves, M.G. (2010) – Estudo do galgamento de estruturas marítimas utilizando um modelo numérico baseado na teoria da onda em condições de água pouco profunda. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, APRH/UNIVALI, 10(4):397-417.

Reis, M.T.; Neves, M.G.; Hu, K. (2009a) - Wave overtopping of a porous structure: numerical and physical modeling. *Journal of Coastal Research*, SI 56(II):539-543.

Reis, M.T.; Neves, M.G.; Hu, K.; Lopes, M.R.; Silva, L.G. (2009b) - Final rehabilitation of Sines west breakwater: physical and numerical modelling of overtopping. *Proc. ICE Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2009*, 636-647, Thomas Telford, London, UK.

Reis, M.T.; Neves, M.G.; Lopes, M.R.; Hu, K.; Silva, L.G. (2011) – Rehabilitation of Sines West Breakwater: wave overtopping study. *Maritime Engineering Journal, Proc. ICE*, 164(MA1):15-32.

Ruggiero, P.; Komar, P.D., McDougal, W.G., Marra, J.J., Beach, R.A. (2001) – Wave runup, extreme water levels and the erosion of properties backing beaches. *Journal of Coastal Research*, 17(2):407-419.

Sancho, F.E. – SPANWAVE II – Wave-induced turbulence over barred beaches. Final report, LNEC, Relatório em preparação (em inglês).

Simões, A. (2006) - The Sea Wave Climate at the Islands of Macaronesia. A Study at the Azores. *CLIMAAT Project Report*.

Stockdon, H.F.; Holman, R.A.; Howd, P.A.; Sallenger Jr., A.H. (2006) – Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53:573-588.

Teixeira, S.B. (2009) – Demarcação do leito e da margem das águas do mar no litoral sul do Algarve. Administração da Região Hidrográfica do Algarve, Faro, 1-207.

U. S. Army Corps of Engineers. (USACE) (2006) – *Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100*, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (6 volumes).

Van Albada, G.D., Van Leer, B. and Roberts, Jr. W.W. (1982) – A comparative study of computational methods in cosmic gas dynamics. *Astronomy & Astrophysics*, 108:76-84.

Van Gent, M.R.A. (1994) – The modelling of wave action on and in coastal structures. *Coastal Engineering*, 22:311-339.

Van Gent, M.R.A. (1996) – Numerical modeling of wave interaction with dynamically stable structures. *Proc. 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, 1930-1943, Orlando, Florida, USA.

Van Leer, B. (1979) – Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second order sequel to Godunov's method. *Journal of Computational Physics*, 32:101-136.

Anexo A – Exemplo de introdução de dados no modelo AMAZON

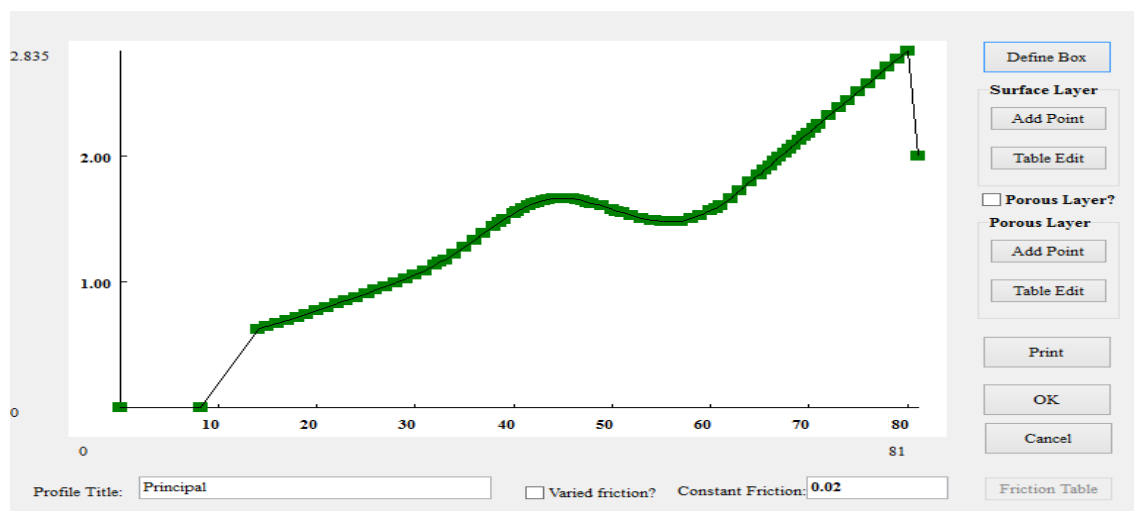


Figura A.1 – Interface de definição da geometria do perfil.

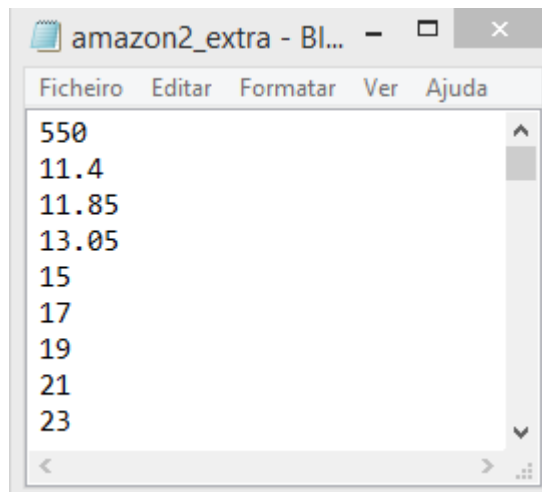


Figura A.2 – Ficheiro de definição do número de sondas colocadas no modelo AMAZON e sua localização ao longo do domínio.

x

Run Parameters

Run Title:

Enter Wave and Sea Level Conditions:

Wave Height (Hs): m Wave Spectrum: ▾

Wave Period (T): s Gamma: Water depth (TMA only): m

Sea Level: m

☐ Time varying sea level ☐ Glass wall at the right end

Enter Grid Resolution and Friction

☒ Non-uniform Grid Uniform Grid Resolution:

☒ Bottom friction applied

Enter Wave Number

Wave Numbers: Warming-up time (in wave number):

Define Observing Points

Point One: m Point Two: m

Drainage

Location: m Capacity: m³/s

Define Observing Points

☐ Tidal boundary applied

Tidal Range: m Tidal Period: hrs Tidal Phase: 0 - 1

Vertical Barrier ☐ Vertical barrier applied Power "n" (calibration):

Location: m Bottom: m Top: m

Computing Parameters

Minimum wet depth: m Minimum friction depth: m

Define Porous Layer

☐ Porous layer applied

Porous Equations: ▾

Interface Permeability: m/s

Porosity: 0 - 1

Figura A.3 – Interface de definição dos dados de entrada do modelo AMAZON.

Anexo B – Ficheiros MatLab® utilizados

Neste anexo será apresentado um m-file utilizado em MatLab, fornecido pelo LNEC: o ficheiro “trares.m” que põe os resultados do modelo AMAZON (ficheiro amazon2_extra.out) igualmente espaçados no tempo através de interpolações e calcula o espraçamento (série temporal e estatísticas). Este programa chama o programa “zero_crossing.m” que faz a análise no tempo das séries temporais, separando as ondas pelo método do zero-ascendente, e escreve os parâmetros de agitação num ficheiro de resultados (resultados'caso'.txt). O ficheiro “zero_crossing.m” tem de estar na mesma diretoria que o ficheiro “trares.m”.

Apresenta-se, em seguida, o ficheiro “trares.m”:

```
close all
clear all
clc
tinil=55.;      %tempo inicial de análise da separação da inc-ref nas
3 1as sondas
tini=150.;      %tempo inicial de análise
tfinal=208.;    %tempo final de análise

caso='B mfd 0.003 Grid0004'
%diretoria dos dados deste programa, que são os resultados do AMAZON
dirdados=['C:\Users\Rui Mestre\Desktop\AMAZON\Wave Condition B\MWD-6
Min Fric Depth\Bot Fric 0.02 MFD\Min Fric Depth 0.003\Grid0004
AMAZON'];
dirres= ['C:\Users\Rui Mestre\Desktop\Programas MatLab']; %diretoria
dos resultados

% Abre ficheiro com a posição das ondas
cd (dirdados);
file2 = ['amazon2_extra.txt'];
fid2=fopen(file2);
nc=str2num(fgetl(fid2));
xs=fscanf(fid2,'%f');
status=fclose(fid2);

%abre ficheiro de dados com o perfil para calcular profundidade de
cada sonda: 1 ficheiro com o n. de pontos e com o perfil

file1 = ['perfil.txt'];
fid1=fopen(file1);
nperfl=str2num(fgetl(fid1));
perfl=fscanf(fid1,'%f %f', [2 nperfl]);
xii=perfl(1,:);
yii=perfl(2,:);
status=fclose(fid1);
% Calcula a profundidade de cada sonda
h=interp1(xii,yii,xs);

%file=input('Nome do ficheiro de dados: ','s');
file = ['amazon2_extra.out'];
% ficheiro com t e eta
```

```

% while exist(file)==2
a=load(file);
x=a(1:end,1);
for i=1:nc
    j=2*i;
    a1=(a(1:end,j));
    y(i,:)=a1;
end

%abre ficheiro de resultados
cd (dirres);
nameres=['resultados',caso, '.txt'];
fid3=fopen(nameres,'w');
fprintf(fid3,'Sonda \t H_s \t \t H_mean \t \t H_10 \t \t H_max \t \t
Hrms \t \t T_mean \t \t T_s \t \t T_max \t \t Tl_3 \n');
fprintf(fid3,'\r\n');

% interpola e põe resultados do AMAZON em t igualmente espaçado
dt=0.001;
xi=tini:dt:tfinal;
xil=tinil:dt:tfinal;
for i=1:nc;
    y1=y(i,:);
    yi=interp1(x,y1',xi);
    yiint(i,:)=yi;
    freq=1/dt; %data frequency em Hz (1/dt)
% RESULT is a structure with different fields:
% Significant wave height, Mean wave height, 1/10th wave height,
Maximum wave
% height, Mean wave period, Significant period and a table "wave" with
% following columns 1: wave height ts, 2: periods.
%3- Calcula parametros com base numa análise de zero up-crossing
    if ((max(yi)-min(yi))<=0.001) %ondas de H<1 mm não se calculam
        res=[];
    else
        [res,name]=zero_crossing1(yi,freq);
        res(isnan(res)) = []; %retira 'NaN' do vector res

        fprintf(fid3,'%i \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t
%f \t %f \n ',i,res);

    end

    hsonda(i,:)=yi(:)-h(i);
end

% Cálculo da série temporal do run-up

for i=1:length(yi) %tempo
    j=1; %sonda
    while (hsonda(j,i) >= 0.0001); %erro mínimo admissível de 0.1
mm
        j=j+1;
    end
    runup(i)= h(j-1)-2.05;
    i=i+1;
    j=1;
end
[resru,nameru,wavesrunup, meanrunup]=runup_zero_crossing1(runup,freq);

```



```

% escrita dos resultados
fprintf(fid3, '\r\n');
fprintf(fid3, 'Runup mean \t Hcrest_s \t\t Hcrest_mean \t Hcrest_10\t
Hcrest_max \t Hcrest_rms \t T_mean \t \t T_s \t \t T_max \t \t T1_3
\n');
fprintf(fid3, '\r\n');
fprintf(fid3, ' %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f
\t %f \t\t\n ', meanrunup, resru);

status=fclose(fid3);
x11=tini1:dt:tfinal;
for i=1:3;
    y2=y(i,:);
    yi2=interp1(x,y2',x11);
    yiint2(i,:)=yi2;
end
dd=size(x11');
nameincref=['dados_inc_ref', caso, '.txt'];
fid4=fopen(nameincref, 'w');
for i=1:dd
    fprintf(fid4, '%f %f %f\n ', yiint2(1,i), yiint2(2,i), yiint2(3,i));
%     fprintf(fid3, '\r\n');
end
status=fclose(fid4);

close all

```


Anexo C – Publicação em Congresso Internacional

A NEW APPLICATION OF THE NONLINEAR SHALLOW WATER NUMERICAL MODEL AMAZON TO STUDY OWC IN VERTICAL BREAKWATERS

M.T. Reis¹, R. Mestre¹, M.G. Neves¹, K. Hu², J. Dias¹, A. Mendonça¹, E. Didier¹, and C.J.E.M. Fortes¹

Abstract: This paper illustrates the application of a non-linear shallow water numerical model, AMAZON, to study Oscillating Water Column Wave Energy Converters (OWC-WEC) integrated in vertical breakwaters. This application has been performed within the scope of the research project *DITOWEC – Development of an Integrated Tool for Numerical Modelling of Oscillating Water Column Wave Energy Converters Integrated in Vertical Breakwaters*. The main objective of *DITOWEC* is the development of an innovative integrated tool for numerical modeling of wave propagation from offshore to nearshore, of wave-structure interaction and of the complex nonlinear hydrodynamic and aerodynamic phenomena that occur in an OWC-WEC. This development is supported by field data from PICO power plant (Azores) and from two-dimensional experimental data, from physical model tests carried out at LNEC, which are used here for AMAZON calibration/validation. A sensitivity analysis on AMAZON parameters (grid dimension and momentum adjustment factor at vertical barrier) is presented and discussed, centered on wave height obtained near and inside the water chamber, amplification factor and phase lag. The obtained AMAZON results are encouraging though more tests are required for different water depths, vertical openings and incoming wave periods, allowing further calibration and validation of the momentum adjustment factor.

INTRODUCTION

Besides breakwater's classical functions, these structures have been recently assigned the complementary function of integrating wave energy converters (WECs) for electric production. An example of this is the use of the Oscillation Water Column (OWC) technology, in which the water column inside the OWC plant moves up and down as waves enter and exit the plant, producing an air flow that induces the rotation of a turbine connected to an alternator (Falnes, 2007). This type of wave energy device can

-
- 1 Harbours and Maritime Structures Division, National Laboratory for Civil Engineering (LNEC), Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisbon, Portugal. treis@lnec.pt; mastah26@hotmail.com; gneves@lnec.pt; jdias@lnec.pt; amendonca@lnec.pt; edidier@lnec.pt; jfortes@lnec.pt
 - 2 Royal HaskoningDHV, Burns House, Harlands Road, Haywards Heath RH16 1PG, UK. keming.hu@rhdhv.com

be integrated, during the construction, on a vertical breakwater consisting of caissons of great dimensions. Examples of this innovative solution are the wave energy plants of Sakata in Japan (1990) and, more recently, of Mutriku in Spain (2011) (Figure 1).



Fig. 1. Examples of wave energy plants integrated on vertical breakwaters: Sakata (Japan) and Mutriku (Spain).

The integration of Wave Energy Converter (WEC) devices on vertical breakwaters has several advantages:

- Financial amortization of the infrastructure through exploitation of wave energy;
- Reduced environmental impact, since the device integration area has already been affected by the harbor/coastal protection structure;
- Production of renewable energy;
- Location of the WEC in areas of higher wave energy than on the coast (the local depth, in the case of vertical breakwaters, is typically of the order of 20-25 m, which favors the conservation of incident wave energy);
- Reduced maintenance costs due to the ease of access to the WEC.

Studies of OWC-WECs integrated in vertical breakwaters are complex, involving hydrodynamic and aerodynamic phenomena, strong interactions between the two phases (water and air) and non-linear phenomena due to:

- Wave propagation;
- Wave-structure interaction;
- Interaction between the air and the up and down movement of the water column inside the OWC chamber;
- Cyclic air compression and expansion in the pneumatic chamber due to the reduction of the area between the pneumatic chamber and the duct section where the turbine is located;
- Effects of pressure loss at the turbine responsible for a strong interaction with the free surface movement in the chamber.

To study the integrated OWC-WEC in vertical breakwaters or on the shoreline, a research project was launched in July 2014, called *DITOWEC – Development of an Integrated Tool for Numerical Modelling of Oscillating Water Column Wave Energy Converters Integrated in Vertical Breakwaters*, with the main purpose of developing an integrated tool capable of modeling all these phenomena by coupling different numerical models for wave propagation, wave-structure interaction, hydrodynamics and aerodynamics of the OWC device. It is validated with experimental data from physical model tests at LNEC before being applied to the OWC-WEC of Pico, Azores, Portugal,

for real bathymetry and offshore wave climate (Tolman, 1999; Simões, 2006). This power plant has been monitored since 2005 by the Portuguese Wave Energy Centre (Brito Melo *et al.*, 2007), which allows comparing numerical and prototype results for several incident wave conditions.

To study wave-structure interaction, the existing nonlinear shallow water (NLSW) models have mainly been validated for impermeable structures (e.g. Dodd, 1998; Hu *et al.*, 2000) and for permeable beaches (e.g. Van Gent, 1996, Clarke *et al.*, 2004). In the present work, the NLSW model AMAZON (Hu, 2000) is applied to study the hydrodynamics around an OWC-WEC. AMAZON has been validated in a variety of representative test problems involving steady/unsteady, inviscid/viscous and subcritical/supercritical flows (Hu, 2000; Hu *et al.*, 2000; Hu and Meyer, 2005). It has also been validated and extensively used to study the overtopping of impermeable dikes and, more recently, permeable sloping structures (Reis *et al.*, 2008b, 2009a,b, 2011), but was never applied for a OWC-WEC, as in this case. The new developments in the model, implemented by LNEC and Royal HaskoningDHV, include the use of controlling the Godunov-type numerical flux to represent flow constraint by a vertical barrier. LNEC's physical model results, obtained at a scale of around 1:35, are used to check AMAZON's applicability to this kind of structures.

The main purpose of this paper is to present the recent developments in AMAZON, with the prospect of applying the model to study a chamber delivering air flow to a turbine model. However, at present, initial developments have been implemented to analyze its application to a simplified plant geometry: a chamber with a fully opened airway, allowing free air flow in and out of the chamber. By the same approach, the authors believe it is possible to simulate air flow by dynamically linking AMAZON with a simple aerodynamic model that will take into account the turbine characteristics and the air flux induced by the water surface movement inside the chamber (Josset and Clément, 2007).

After this introduction (Section 1), Section 2 of the paper describes the AMAZON model and its recent developments. Section 3 presents, briefly, LNEC's dataset from 2D physical model tests used for AMAZON calibration/validation. Section 4 includes a sensitivity analysis on AMAZON parameters, time series of the free surface elevation at gauges located near the water chamber, time series of the mean free surface inside the chamber, amplification factor and phase lag. The paper ends with some final remarks (Section 5).

AMAZON DESCRIPTION

AMAZON is a high-resolution two-dimensional finite volume numerical model capable of simulating supercritical flow and capturing moving hydraulic jumps. It is based on solving the nonlinear shallow water (NLSW) equations (Hu, 2000; Hu *et al.*, 2000). The pressure is assumed hydrostatic and the equations describe water motions in terms of the instantaneous total water depth and the depth-averaged velocity. The equations are solved using a high-resolution finite volume method that is 2nd order in time and space. The MUSCL-Hancock scheme (Van Leer, 1979; Van Albada *et al.*, 1982) employed is a Godunov-type method that uses a monotonic reconstruction of the conserved variables to obtain values at cell interfaces that prevent spurious oscillations in the solution. Solutions to local Riemann problems that are required for the corrector stage are calculated using the HLL (Harten, Lax and Van Leer) approximate Riemann solver,

capable of capturing bore waves and of simulating supercritical flows (Harten *et al.*, 1983). It uses a “zero-equation” turbulence model. A full description of the computation scheme can be found in Hu (2000).

AMAZON was designed for “violent” (referring to moving flow discontinuity) flow such as hydraulic jumps, tsunamis, bore waves (including tidal bores) and dam breaks. Because of these strengths, AMAZON has been used for simulating wave runup and overtopping. It has been tested for wave overtopping calculations on single slope walls, slope walls with berms, and vertical seawalls (Hu *et al.*, 2000). Vertical and nearly-vertical structures can be approximated by a steep slope and the results have been satisfactory (Hu, 2000). At the crest of a structure, AMAZON is able to continue computing as the flows, either side of the crest, separate, overtop or return. The model also includes a bottom friction coefficient, f , to account for dissipation of wave energy across the structure and the foreshore due, for example, to slope roughness (Hu, 2000). The computed results compared reasonably well with analytical solutions and benchmark tests derived from laboratory data. In the tested ‘standard’ profiles, AMAZON performed as well as some empirical methods. A series of validity tests on AMAZON were undertaken by Hu and Meyer (2005) and Reis *et al.* (2008a) compared with both experimental data and other overtopping models, which provided confidence in AMAZON as well as guidance for practical engineering applications.

AMAZON is an unsteady model so that random waves can be simulated as well as monochromatic waves. It uses a non-reflective wave inlet boundary condition, which is able to remove at the seaward boundary more than 98% of the energy of any waves reflected from the modeled structures. As a consequence, the seaward boundary can be set close to the structure to avoid deep water conditions, where AMAZON has limitations. According to Hu and Meyer (2005), AMAZON produces good results when its seaward boundary is located at a distance from the structure toe of approximately one wavelength.

AMAZON can model sloping structures, with or without berms, and with or without a crown wall. Since it is a depth-averaged model, it does not model curved wave return walls. Vertical and nearly-vertical structures can be approximated by a steep slope and the results have been satisfactory (Hu, 2000). At the crest of a structure, AMAZON is able to continue computing as the flows, either side of the crest, separate, overtop or return. The model also includes a bottom friction coefficient to account for dissipation of wave energy across the structure and the foreshore due, for example, to slope roughness (Hu, 2000).

AMAZON has been validated in a variety of representative test problems involving steady/unsteady, inviscid/viscous and subcritical/supercritical flows. It has also been validated and extensively used to study the overtopping of impermeable dikes.

The original version of AMAZON did not explicitly account for porous flow. The subsequent development of the porous flow model, by LNEC and Royal HaskoningDHV, includes the addition of one porous layer to the original model design and the consideration of a constant porosity for the whole porous element. To govern the water exchange between the porous cells, both the Darcy (for laminar stationary flows) and the Forchheimer (for turbulent stationary flows) equations are implemented in AMAZON, allowing overtopping estimates in porous structures and a systematic validation (Reis *et al.*, 2008b, 2011).

Recently, LNEC and Royal HaskoningDHV started the implementation of further developments in AMAZON with the prospect of applying the model to study a chamber delivering air flow to a turbine model. However, at present, initial developments have been implemented to analyse its application to a simplified plant geometry: a chamber with a fully opened airway, allowing free air flow in and out of the chamber. The innovative developments include the use of controlling the Godunov-type numerical flux to represent flow constraint by a vertical barrier. This process does not consider flow details under and around the barrier but introduces a momentum adjustment factor, n (which powers the ratio of numerical flux), to take account of energy loss by vertical turbulence around the barrier.

AMAZON is written in C++ and has a friendly, effective and easy-to-use interface. Its input includes:

- Cross-sections of the structure/beach and foreshore;
- Definition of the characteristics of the porous layer: geometry, porosity, representative particle diameter and porosity coefficients;
- Bottom friction coefficient (which may vary across the structure and foreshore);
- Water level (which may vary by adopting a sinusoidal tide curve or a user provided time series water level);
- Incident waves: AMAZON allows the input of sinusoidal waves, random waves defined by an empirical (e.g. JONSWAP) or a user-defined spectrum, or a wave train obtained, for example, from physical or numerical modeling;
- Computation grid (uniform/non-uniform);
- Other parameters (e.g. minimum wet depth and minimum friction depth).

The output defines the free surface, depth-averaged velocities and, based on these values, the run-up, discharge time series, mean discharges and peak discharges. A detailed description of the model can be found in Hu (2000) and Reis *et al.* (2008b, 2009a,b, 2011).

PHYSICAL MODEL DATA FOR AMAZON VALIDATION

The new developments in AMAZON and its results have been calibrated/validated using a dataset from 2D physical model tests conducted at LNEC. The main goal of these tests is twofold: the study of the hydrodynamic characteristics of the plant and the calibration/validation of the numerical models used within DITOWEC for different levels of the chamber complexity. It aims at optimizing the simulation parameters and accuracy.

The tests were performed at one of LNEC's wave flumes, which is approximately 50 m long and it has 0.80 m of operating width and water depth. The flume is equipped with a random absorbing (Troch, 2005) piston-type wave maker and resistive-type wave gauges are used to determine the wave characteristics in front of the wave maker and in front of the tested structures. A geometric scale of 1:35 is used in order to reduce scale effects.

Up to the present date, physical modeling of a chamber with a fully opened airway has been performed for a regular wave height, H , of 0.038 m and a wave period, T , ranging from 0.67 to 2.30 s (Figure 2). The water depth was 0.46 m at the wave maker

and 0.15 m at the chamber entry. The chamber has 0.20 m width and an opening 0.075 m wide, which is half the water depth at the chamber.

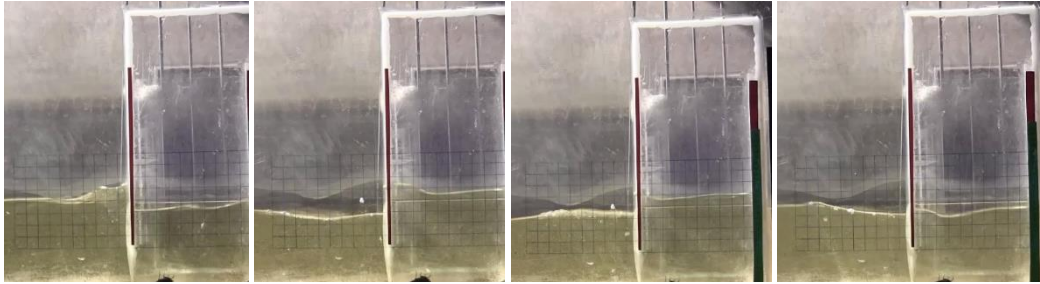


Fig. 2. Physical model near the water chamber for four instants during a test carried out for $T=1.0$ s and $H=0.038$ m.

Figure 3 shows a scheme of the wave flume, water chamber and wave gauge positions. Free surface elevation was measured at ten sections of the flume: near the wave maker, at the toe of the smooth ramp, on the ramp, before and inside the water chamber. Each wave condition was repeated eight times to ensure the accuracy of the experimental results.

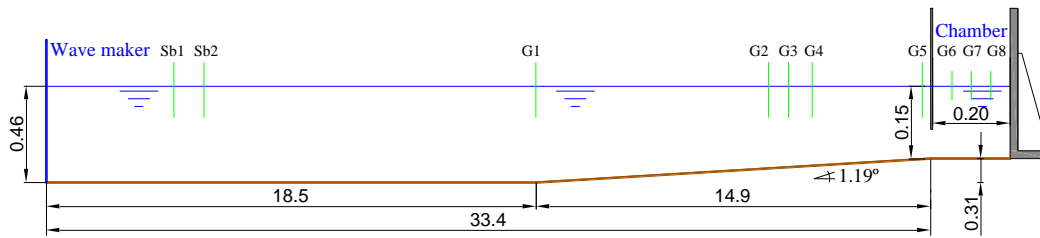


Fig. 3. Scheme of the wave flume, water chamber and wave gauge positions (dimensions are in meters).

The recorded time series of surface elevation at gauge G4 has been used as input condition at the AMAZON seaward boundary, since AMAZON requires this boundary to be located at approximately one wavelength from the structure toe (Reis *et al.*, 2009a,b). The recorded time series of surface elevation at gauges G5 to G8 have been used to calibrate/validate AMAZON results.

RESULTS

The next sections present a sensitivity analysis on AMAZON parameters (such as mesh size and momentum adjustment factor, n , at the vertical barrier) and, for the chosen parameters, the time series of the free surface elevation at gauges G5 (before the water chamber), the time series of the mean (G6 to G8) free surface inside the chamber, the amplification factor (defined as the ratio between the mean wave height inside the water chamber and the incident wave height) and the phase lag (the angular difference between the time series of the free surface elevation inside and outside the chamber). Three wave periods are analyzed: 0.89 s, 1.15 s and 1.60 s, for the wave height of 0.038 m.

Sensitivity Analysis

The sensitivity analysis on the mesh resolution was carried out for mesh sizes between 0.001 m and 0.02 m, constant in the whole domain. The adjustment factor, n , was changed between 0.02 and 4.

Figure 4 shows the time series of free surface elevation for gauges G5 (before the chamber) and G7 (middle gauge inside the chamber) for meshes 0.02 m, 0.004 m and 0.001 m, using $n=1$, for $T=1.15$ s. The figure shows that, between 0.004 and 0.001, differences are not relevant and that the 0.02 m mesh is too coarse. To decide on the mesh to be used in further calculations, Table 1 shows the size and the corresponding computational time for the four meshes for $T=1.15$ s. It can be observed that the 0.004 m mesh represents the best choice based on the accuracy and the computational time required.

Figure 5 shows the time series of free surface elevation for gauges G5 and G7 for mesh 0.004 m, for different values of n , from 0.2 to 4, for $T=1.15$ s. It can be observed that the decrease of n leads to a decrease in the wave height outside the chamber and the opposite happens inside. For larger values of n ($n \geq 2$), no energy seems to pass below the vertical barrier into the chamber. For $0.02 \leq n < 0.2$, no significant changes were observed, so the results are not presented.

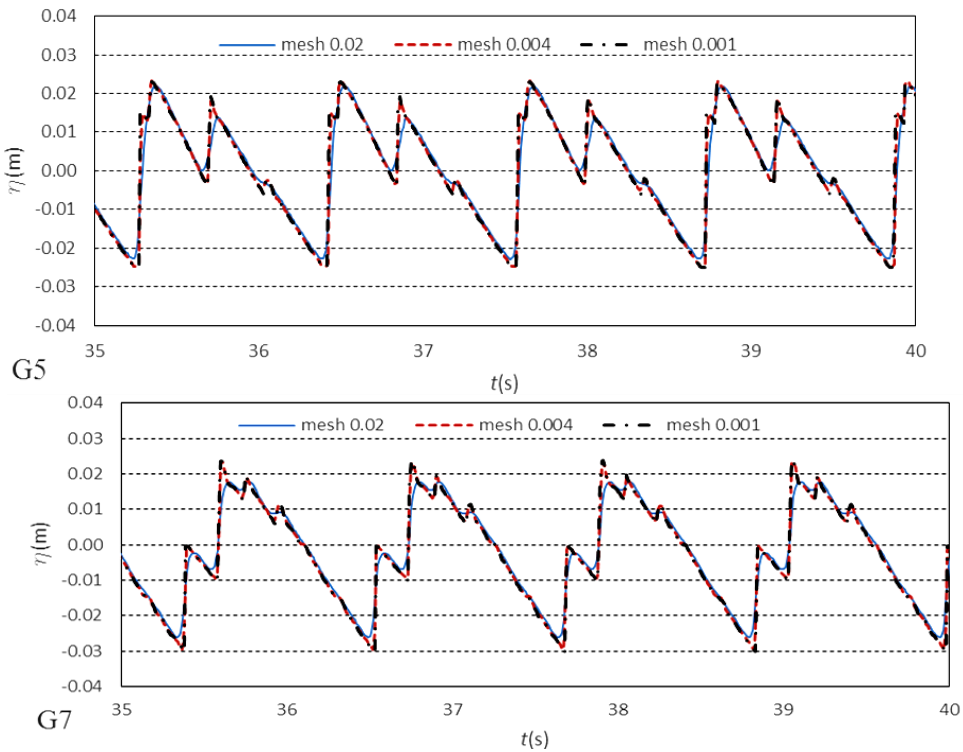


Fig. 4. AMAZON time series of free surface elevation for gauges G5 and G7 for meshes 0.02 m, 0.004 m and 0.001 m, using $n=1$, for $T=1.15$ s and $H=0.038$ m.

Table 1. Size and computational time for the meshes considered, for $T=1.15$ s

Mesh size, m	Computational Time, min
0.020	0.5
0.004	8
0.003	20
0.002	44
0.001	98

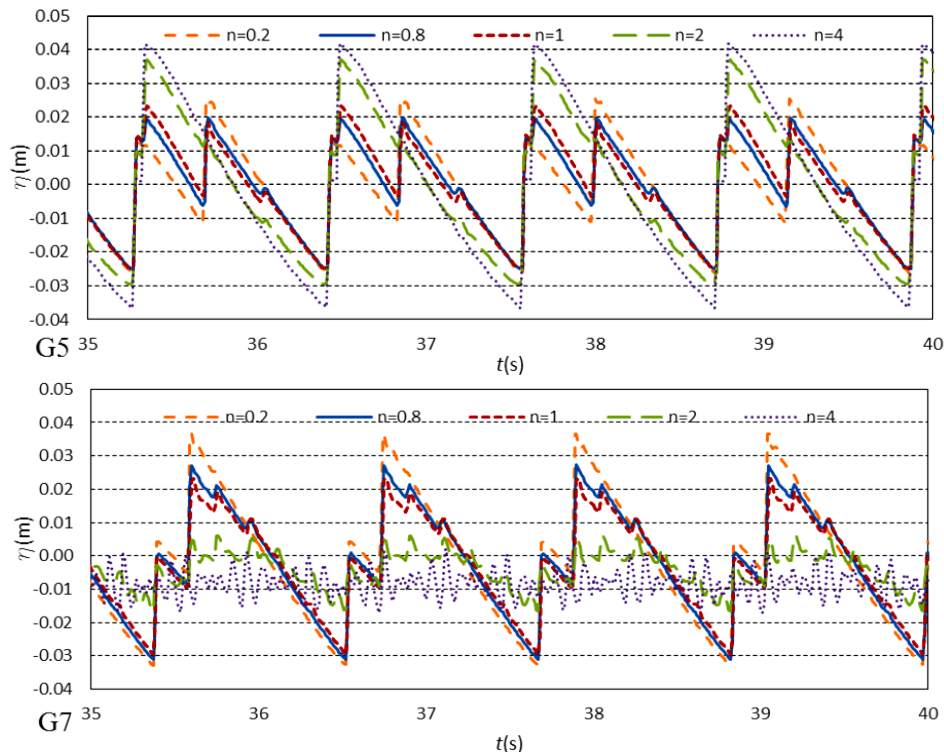


Fig. 5. AMAZON time series of free surface elevation for gauges G5 and G7 for mesh 0.004 m, for different values of n , from 0.2 to 4, for $T=1.15$ s and $H=0.038$ m.

Calibration/Validation of AMAZON Results

AMAZON calibration was carried out by comparing the AMAZON results obtained for mesh 0.004 m, $T=1.15$ s and $n=0.2$ to 4, with LNEC's physical model data. Figure 6 shows the time series of free surface elevation outside the water chamber (gauge G5) and of the mean free surface inside the water chamber (mean of gauges G6, G7 and G8), both from the numerical and the physical models.

The results suggest that the value of n that provides the best agreement between AMAZON results and the experimental data is $n=1.0$, despite the differences in wave shape that may be due to the way AMAZON simulates wave breaking (approximated by steep fronts, represented by bores, thus ignoring the detailed structure of breaking waves). The amplification factor and the phase lag for experimental and numerical results are shown in Table 2 for $n=1.0$.

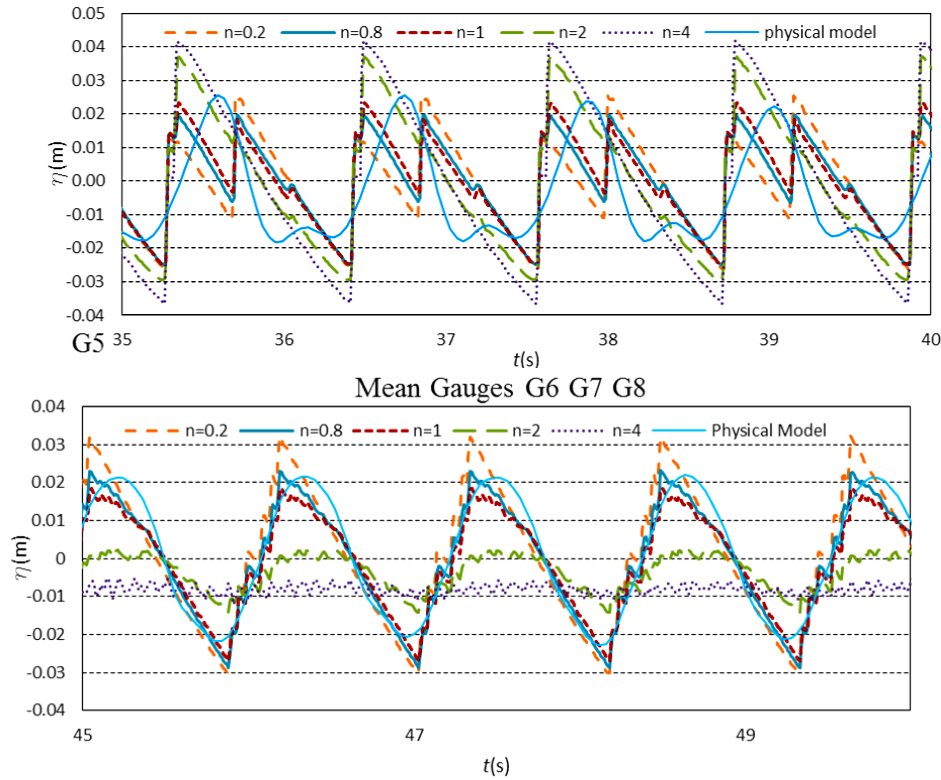


Fig. 6. Time series of free surface elevation outside the water chamber (G5) and of mean free surface inside the water chamber obtained from the physical model and from AMAZON for mesh 0.004 m, and different values of n , from 0.2 to 4, for $T=1.15$ s and $H=0.038$ m.

Table 2. Amplification factor and phase lag , for $T=1.15$ s, for experimental and numerical (for $n=1.0$) results

Data Source	Amplification Factor	Phase Lag
Experimental	1.13	80.6
Numerical	0.94	93.9

Although the wave shape is not correctly modeled by AMAZON, the value of the amplification factor and of the phase lag obtained with the model do not differ much from the experimental values.

Consequently, AMAZON was validated for the two other periods considered (0.89 s and 1.60 s), using a mesh size of 0.004 m and $n=1.0$. Figures 7 and 8 and Table 3 present a comparison of AMAZON results with experimental data. The results show that for $T=0.89$ s, the value of the amplification factor is higher than the value obtained from the experiments and the opposite happens for the phase lag; for $T=1.60$ s, the values of the amplification factor and of the phase lag are lower than the values obtained from the experiments. The results suggest that n should be a function of the wave period and that the longer the wave period, the smaller n should be. This is in accordance with the fact that the longer the wave, the greater its ability to penetrate in the chamber. Consequently, to simulate this behavior, the constraint on the barrier imposed in the model should be reduced.

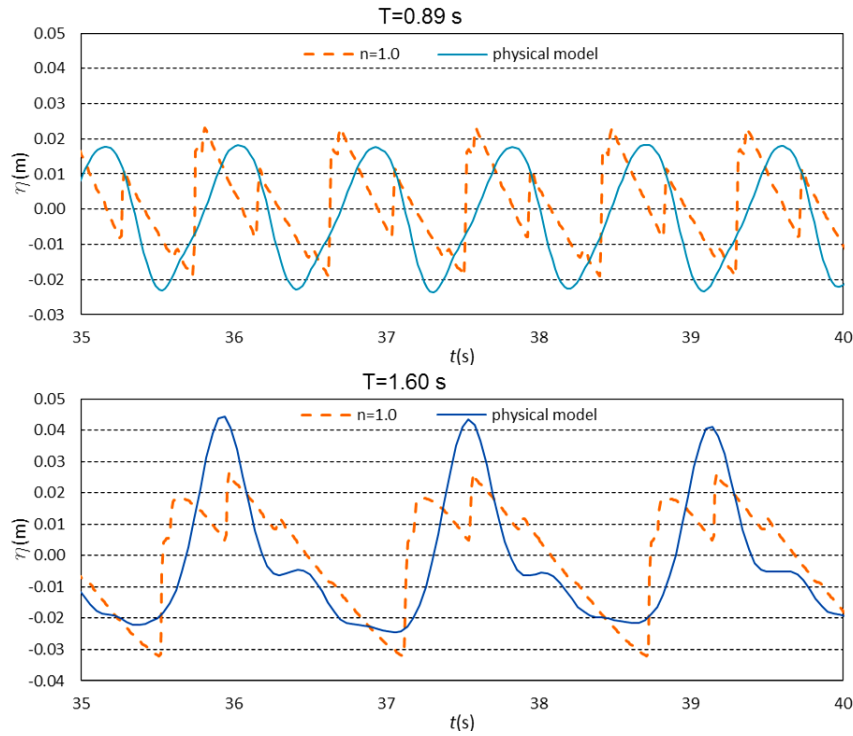


Fig. 7. Time series of free surface elevation for gauge G5 from the physical model and from AMAZON for mesh 0.004 m, $n=1.0$, $T=0.89$ s and 1.60 s, $H=0.038$ m.

FINAL REMARKS

Recently, LNEC and Royal HaskoningDHV have started the implementation of further developments in AMAZON with the prospect of applying the model to study a chamber delivering air flow to a turbine model. At present, initial developments have been implemented to analyze its application to a simplified plant geometry: a chamber with a fully opened airway. The developments include the use of controlling the Godunov-type numerical flux to represent flow constraint by a vertical barrier. By the same approach, the authors believe it is possible to simulate air flow by dynamically linking AMAZON with a simple aerodynamic model that will take into account the turbine characteristics and the air flux induced by the water surface movement inside the chamber (Josset and Clément, 2007).

Physical model results are used to check AMAZON's applicability to the fully opened airway chamber. AMAZON surface elevation outside and inside the chamber, amplification factor and phase lag are compared with those obtained in the physical model tests carried out at LNEC. By choosing suitable values for the calibration parameter, n , it is possible to obtain AMAZON results for the tested wave periods that are close to the values found in the physical model. However, it seems that the value of n should be a function of the wave period and that the longer the period, the smaller n should be.

AMAZON results are encouraging but more tests are required with different water depths, vertical openings and incoming wave periods, allowing further calibration and validation of the momentum adjustment parameter, n . The improvements to AMAZON are important due to its computational efficiency when compared to more comprehensive

numerical models.

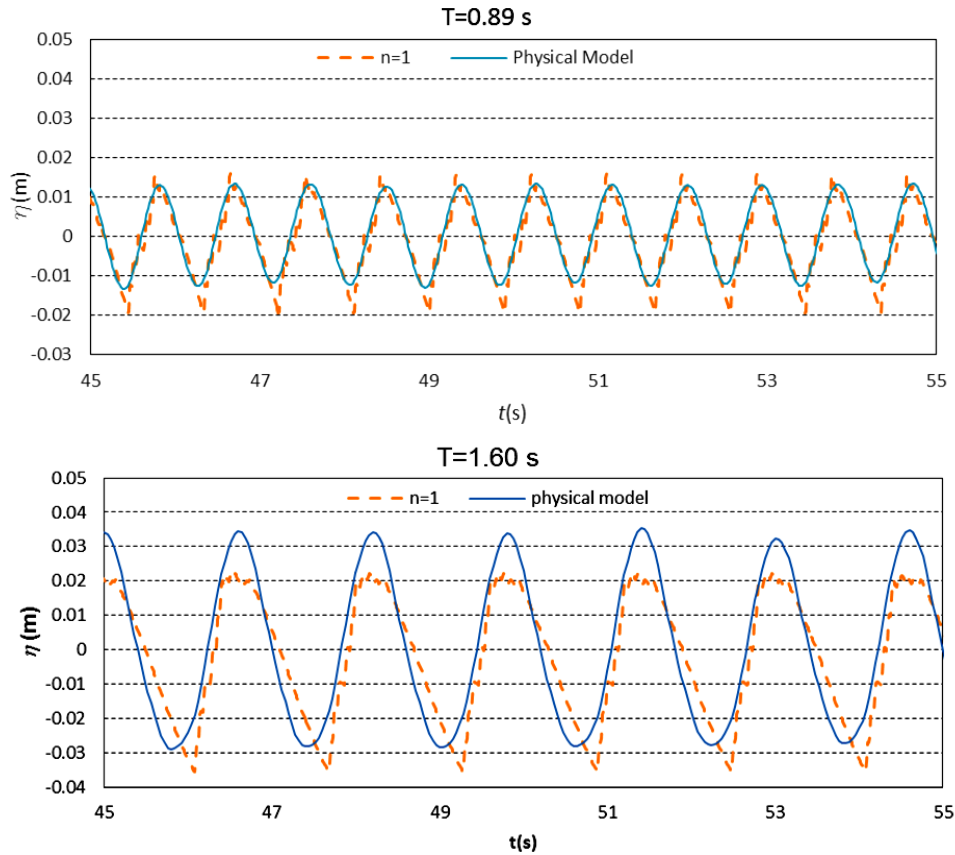


Fig. 8. Time series of mean free surface inside the water chamber from the physical model and from AMAZON for mesh 0.004 m, $n=1.0$, $T=0.89$ s and 1.60 s, $H=0.038$ m.

Table 3. Amplification factor and phase lag for $n=1.0$, for experimental and numerical results, for $T=0.89$ s and 1.60 s

T, s	Amplification Factor		Phase Lag	
	Experimental	Numerical	Experimental	Numerical
0.89	0.67	0.85	132.1	117.3
1.60	1.66	1.06	37.8	20.3

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the financial support of FCT, Portugal, through project PTDC/ECM-HID/1719/2012.

REFERENCES

- Brito Melo, A., Neumann, F., Didier, E. and Sarmento, A. (2007). "Full-scale data assessment in OWC Pico Plant". Proc. ISOPE, Lisbon, 447-454.
- Clarke, S., Dodd, N. and Damgaard, J. (2004). "Modelling flow in and above a porous beach". Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 130(5), 223-233.
- Dodd, N. (1998). "Numerical model of wave run-up, overtopping and regeneration". Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 124(2), 73-81.

- Falnes, J. (2007). "A review of wave-energy extraction". *Marine Structures*, 20(4), 185-201.
- Josset, C. and Clément, A.H. (2007). "A time-domain numerical simulator for oscillating water column wave power plants". *Renewable Energy*, 32, 1379-1402.
- Harten, A., Lax, P.D. and Van Leer, B. (1983). "On upstream differencing and Godunov type schemes for hyperbolic conservation laws". *SIAM Review*, 25(1), 35-61.
- Hu, K. (2000). "High-Resolution Finite Volume Methods for Hydraulic Flow Modelling". PhD Thesis, Manchester Metropolitan University, UK, 194p.
- Hu, K. and Meyer, D. (2005). "The validity of the non-linear shallow water eq. for modelling wave runup and reflection". *Proc. ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '05*, 195-206.
- Hu, K., Mingham, C.G. and Causon, D.M. (2000). "Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the non-linear shallow water equations". *Coastal Engineering*, 41(4), 433-465.
- Reis, M.T., Hu, K., Hedges, T.S. and Mase, H. (2008a). "A comparison of empirical, semiempirical, and numerical wave overtopping models". *Journal of Coastal Research*, 24(2B), 250-262.
- Reis, M.T., Hu, K., Neves, M.G. and Hedges, T.S. (2008b). "Numerical modelling of breakwater overtopping using a NLSW equation model with a porous layer". *Proc. 31st ICCE, Hamburg, Germany, August 31 to September 5*, World Scientific, 3097-3109.
- Reis, M.T., Neves, M.G. and Hu, K. (2009a). "Wave overtopping of a porous structure: Numerical and physical modelling". *Journal of Coastal Research*, SI 56, 539-543.
- Reis, M.T., Neves, M.G., Hu, K., Lopes, M.R. and Silva, L.G. (2009b). "Final rehabilitation of Sines west breakwater: physical and numerical modelling of overtopping". *Proc. ICE Coasts, Marine Structures and Breakwaters*, 2, 636-647.
- Reis, M.T., Neves, M.G., Lopes, M.R., Hu, K. and Silva, L.G. (2011). "Rehabilitation of Sines west breakwater: wave overtopping study". *Maritime Engineering*, 164(MA1), 15-32.
- Simões, A. (2006). "The Sea Wave Climate at the Islands of Macaronesia. A Study at the Azores". CLIMAAT Project Report.
- Tolman, H.L. (1999). "User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18". NOAA/NWS/NCEP/OMB technical note 166, 110p.
- Troch, P. (2005). "User Manual: Active Wave Absorption System". Gent University, Department of Civil Engineering, Denmark.
- Van Albada, G.D., Van Leer, B. and Roberts, Jr. W.W. (1982). "A comparative study of computational methods in cosmic gas dynamics". *Astronomy & Astrophysics*, 108, 76-84.
- Van Gent, M.R.A. (1996). "Numerical modeling of wave interaction with dynamically stable structures". *Proc. 25th ICCE, Orlando, Florida, USA, 1930-1943*.
- Van Leer, B. (1979). "Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second order sequel to Godunov's method". *Journal of Computational Physics*, 32, 101-136.